

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TAMIRES DE ALMEIDA SFEIR

PLANEJAMENTO DA ETAPA DE AQUISIÇÃO DA CADEIA DE
SUPRIMENTOS DA INDÚSTRIA FLORESTAL – APLICAÇÃO EM INDÚSTRIA
CANADENSE

CURITIBA

2016

TAMIRES DE ALMEIDA SFEIR

PLANEJAMENTO DA ETAPA DE AQUISIÇÃO DA CADEIA DE
SUPRIMENTOS DA INDÚSTRIA FLORESTAL – APLICAÇÃO EM INDÚSTRIA
CANADENSE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de Produção,
Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná,
como requisito parcial à obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. José Eduardo Pécora Junior, PhD.

CURITIBA

2016

S522p

Sfeir, Tamires de Almeida

Planejamento da etapa de aquisição da cadeia de suprimentos da indústria florestal : aplicação em indústria canadense/ Tamires de Almeida Sfeir. – Curitiba, 2016.

94 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 2016.

Orientador: José Eduardo Pécora Junior .

Bibliografia: p. 84-92.

1. Florestas - Planejamento - Programação linear. 2. Cadeia de suprimentos - Administração. 3. Matérias-primas - Aquisição. 4. Solver (Programa de computador). I. Universidade Federal do Paraná. II. Pécora Junior, José Eduardo. III. Título.

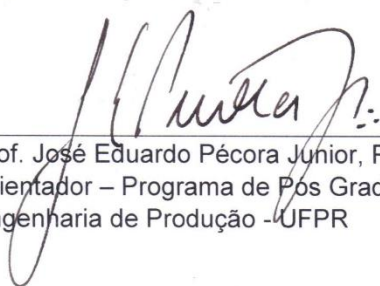
CDD: 658.7

TERMO DE APROVAÇÃO

TAMIRES DE ALMEIDA SFEIR

PLANEJAMENTO DA ETAPA DE AQUISIÇÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA INDÚSTRIA FLORESTAL – APLICAÇÃO EM INDÚSTRIA CANADENSE

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Área de Concentração em Pesquisa Operacional, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



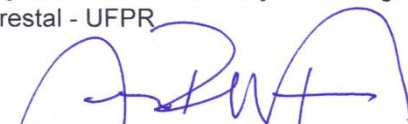
Prof. José Eduardo Pécora Junior, Ph.D.
Orientador – Programa de Pós Graduação em
Engenharia de Produção - UFPR



Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin
Programa de Pós Graduação em Engenharia de
Produção - UFPR



Prof. Dr. Julio Eduardo Arce
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Florestal - UFPR



Prof. Dr. José Roberto Frega
Departamento de Administração Geral e Aplicada
- UFPR

Curitiba, 25 de fevereiro de 2016

DEDICATÓRIA

À minha família, meu alicerce.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para construção deste trabalho. Agradeço de forma desmedida a minha família, por dedicarem tanto esforço, tempo e amor em minha criação e educação. Trilhar este caminho sem vocês não seria possível. Todo o apoio que recebo de vocês, em momentos de conquista e em momentos de desânimo, me encoraja a seguir em frente e me orgulha a refletir para o mundo o que me foi passado.

Agradeço aos meus amigos, novos e antigos (Divas e Rodinha), pela confiança, pelos momentos de descontração, alegria e insegurança compartilhados em inúmeros cafés e conversas, graças a vocês meu coração e alma ficam mais leves e essa batalha tornou-se menos penoso.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, e a todos os professores com quem tive a oportunidade de interagir, oferecendo a mim uma nova carga de conhecimento. Não poderia deixar de agradecer a todos os professores e amigos do Grupo de Tecnologia Aplicado a Otimização (GTAO), poder participar de um grupo de pesquisa com tantas pessoas inspiradoras me enche de orgulho e me instiga a melhorar sempre. Além de ser o porto seguro para os momentos de esgotamento com as pequenas (ou enormes) dificuldades encontradas ao longo da dissertação, aqui aprendi que a máxima “*dividir para conquistar*” é genuína.

Agradeço imensamente ao meu co-orientador, professor Angel Ruiz e a Université Laval, pela incrível oportunidade e experiência de poder trabalhar junto a grandes consórcios de pesquisa como o CIRRELT e o FORAC. Esta foi uma etapa extraordinária da minha história.

Por fim, meu agradecimento especial ao meu orientador, professor José Eduardo Pécora Jr., por me fazer crescer pessoal e profissionalmente. Divido com ele todas as minhas conquistas, pois sem seus conselhos, desafios, apoio e oportunidades oferecidos nada disto seria hoje possível. Obrigada.

“A ciência não pode prever o que vai acontecer. A ciência pode calcular a probabilidade de alguma coisa acontecer.”

Cesare Mansueto Giulio Lattes

RESUMO

A indústria florestal possui importante papel em diversos países. No Brasil o setor florestal foi responsável por aproximadamente \$10 bilhões do total das exportações nacionais e no Canadá por cerca de \$ 29 bilhões. No entanto, como outros setores, a indústria florestal sofreu com o impacto gerado pelas incertezas da economia global e enfrenta o declínio dos meios de comunicação baseados em papel. Para que os índices obtidos pelo setor continuem a melhorar, a constante busca pela racionalização do uso de recursos na cadeia de suprimentos desta indústria é necessária. Para alcançar este objetivo, há mais de 50 anos a indústria florestal faz uso de técnicas da Pesquisa Operacional para o planejamento e otimização de sua cadeia, seja para melhorar o manejo ou tornar mais eficiente, por exemplo, a entrega de produtos para clientes. O presente trabalho tem por objetivo auxiliar no planejamento da etapa de aquisição de matéria-prima da cadeia de suprimentos de uma empresa produtora de polpa e papel, localizada na Província de Québec, Canadá, minimizando custos relacionados a esta etapa, como custos de transporte, abertura de estoques e manuseio de carga nos mesmos. Propõe-se para tanto, um modelo de programação linear inteira misto, que considera em sua formulação os efeitos causados pelas políticas de restrição de carga impostas pelo governo provincial durante o período de degelo, bem como a influência da redução do teor de umidade na madeira causado pela secagem ao ar livre, durante seu armazenamento em estoques nos custos de transporte. O modelo proposto foi implementado na linguagem C++ e sua solução obtida pelo solver CPLEX. Os resultados obtidos foram comparados ao modelo de transporte tradicional a fim de avaliar sua qualidade. Em todas as instâncias testadas o modelo proposto alcançou um custo total menor que o modelo de transporte, com baixo tempo de processamento, atingindo sempre o valor ótimo.

Palavras-chave: Planejamento florestal; planejamento da cadeia de suprimentos; PLIM; CPLEX; etapa de aquisição.

ABSTRACT

Forestry industry plays an important role in several countries. In Brazil, the forest sector accounted for approximately \$ 10 billion of total national exports and about \$ 29 billion in Canada. However, like many other industry sectors, the forestry industry felt the effects of the world's economic downturn and have faced the decline of the paper-based communication products. In order to continue evolve the results obtained by the forest industry the rational use of resources in its supply chain is required. To meet this goal, for over 50 years the forest industry makes use of Operations Research techniques for planning and optimizing its supply chain, as for example to improve the forest management or make the product delivery process more efficient. The present work aims to assist at the procurement stage of supply chain planning of a pulp and paper company, based in the province of Quebec, Canada, in order to minimize costs encountered during this stage, such as transport, handling and stockyards opening costs. We propose a mixed integer linear programming model, which incorporates in its formulation the effects of the weight restriction zones, imposed during the thawing periods by the Quebec's government and the reduction of the wood moisture caused by the air drying effect, on the transportation costs. The proposed model was implemented using C++ programming language and solved with CPLEX. Results obtained with computational experiments were compared with results achieved by the traditional transportation model, in order to evaluate the model quality. In every tested instance, the proposed model reached lower costs when compared to the transportation model, with low computational times, always reaching the solutions global optimum.

Key-words: Forestry planning; supply chain planning, MILP, CPLEX, procurement Stage.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DO AMBIENTE DIVERGENTE ENCONTRADO EM INDÚSTRIAS DE BASE FLORESTAL.....	22
FIGURA 2 - MATRIZ DE PLANEJAMENTO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL	24
FIGURA 3 – EFEITO DO CONGELAMENTO NO SOLO E PAVIMENTO.	49
FIGURA 4 – DEFLEXÃO DA PAVIMENTAÇÃO, ILUSTRANDO A MUDANÇA TEMPORAL DA FORÇA DO PAVIMENTO (EM UMA PARTE DA ROTA ESTADUAL 172 NO ESTADO DE WASHINGTON – ESTADOS UNIDOS).....	50
FIGURA 5 – DANO CAUSADO EM ESTRADAS DEVIDO AO EFEITO DE CONGELAMENTO-DEGELO.....	51
FIGURA 6 - MAPA DA DELIMITAÇÃO DAS ZONAS DE RESTRIÇÃO NA PROVÍNCIA DE QUÉBEC – CANADÁ.....	52
FIGURA 7 – PÁTIO PARA SECAGEM DE MADEIRA AO AR LIVRE.....	54
FIGURA 8 – MAPA DE ATUAÇÃO DA EMPRESA.....	57
FIGURA 9 - USO DE MODELOS EM PO.....	59
FIGURA 10 – FLUXOGRAMA REPRESENTANDO O PROCESSO DE VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.	69

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - NÍVEIS DE PLANEJAMENTO NA CADEIA DE SUPRIMENTOS FLORESTAL.	26
QUADRO 2 – ESTRUTURA PROPOSTA PARA A APRESENTAÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO DA PESQUISA.....	27
QUADRO 3 - DESCRIÇÃO DA BASE DE TESTES.....	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – TEOR DE UMIDADE MÉDIO EM MADEIRAS VERDES.....	53
TABELA 2 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE P DE TESTES PARA O MODELO DE TRANSPORTE	71
TABELA 3 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE M DE TESTES PARA O MODELO DE TRANSPORTE.	72
TABELA 4 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE G DE TESTES PARA O MODELO DE TRANSPORTE.	73
TABELA 5 - VALORES ÓTIMOS E TEMPOS DE RESOLUÇÃO MÉDIOS OBTIDOS PELO MODELO DE TRANSPORTE.....	74
TABELA 6 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE P DE TESTES PARA O MODELO PROPOSTO.	75
TABELA 7 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE M DE TESTES PARA O MODELO PROPOSTO	76
TABELA 8 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE G DE TESTES PARA O MODELO PROPOSTO	77
TABELA 9 – VALORES ÓTIMOS E TEMPOS DE RESOLUÇÃO MÉDIOS OBTIDOS PELO MODELO PROPOSTO.....	78
TABELA 10 – TESTE DE MÉDIAS ENTRE O MODELO PROPOSTO E O MODELO DE TRANSPORTE.	79
TABELA 11 – CUSTO MÉDIO POR TMA TRANSPORTADA POR CLASSE PARA AMBOS OS MODELOS E A REDUÇÃO DE CUSTO GERADA.	80

LISTA DE SIGLAS

AIMMS	<i>Advanced Interactive Multidimensional Modeling System</i>
AG	Algoritmo Genético
AMPL	<i>A Mathematical Programming Language</i>
ARM	<i>Area Restriction Model</i>
CIRRELT	<i>Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Reseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport</i>
CPP	<i>Cluster Packing Problem</i>
FOR@C	<i>Forest to Costumer</i>
HP	Horizontes de Planejamento
OPL	Linguagem De Programação Otimizada
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PO	Pesquisa Operacional
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
PV&O	Planejamento de Vendas e Operações
SA	<i>Simulated Anneling</i>
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
SCP-Matrix	<i>Supply Chain Planning Matrix</i>
SSD	Sistema de Suporte à Decisão
URM	<i>Unit Restriction Model</i>
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo Geral.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 JUSTIFICATIVA.....	18
1.4 LIMITAÇÕES	19
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 PLANEJAMENTO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS.....	21
2.2 PLANEJAMENTO FLORESTAL	25
2.2.1 Planejamento estratégico florestal.....	30
2.2.1.1 Manejo florestal	30
2.2.1.2 Construção de estradas e transporte.....	31
2.2.1.3 Áreas de conservação	33
2.2.2 Planejamento tático florestal.....	35
2.2.2.1 Plano anual de colheita	35
2.2.2.2 Melhoramento de estradas e transporte	37
2.2.2.3 Plano anual de produção.....	39
2.2.3 Planejamento operacional florestal.....	41
2.2.3.1 Sequenciamento de derrubada – Agendamento de pessoal	41
2.2.3.2 Transporte	43
2.2.3.3 Planejamento da produção.....	45
2.2.4 Planejamento da etapa de aquisição da indústria florestal	47
2.3 ENFRAQUECIMENTO DO SOLO CAUSADA PELO DEGELO.....	48
2.4 UMIDADE DA MADEIRA	52
3 METODOLOGIA.....	56
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	56
3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	56
3.3 ABORDAGEM MATEMÁTICA E RESOLUÇÃO	58

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1 MODELO DE TRANSPORTE	62
4.1.1 Formulação Matemática	62
4.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA - MODELO PROPOSTO	64
4.2.1 Aspectos e hipóteses da modelagem	64
4.3 VALIDAÇÃO	68
4.4 TESTES COMPUTACIONAIS	70
4.4.1 Definição dos testes.....	70
4.4.2 Resultados computacionais	71
5 CONCLUSÕES.....	81
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS.....	84
ANEXO I.....	93

1 INTRODUÇÃO

A relação do homem com a madeira e florestas remonta tempos imemoriais, tornando-se parte da natureza humana. Durante milênios a madeira foi o material mais importante para construção, combustível e fundamental para os precursores da indústria química (RADKAU, 2012).

A indústria florestal possui contribuição importante na economia de diversos países, no Brasil por exemplo, no ano de 2012 o setor colaborou com 4,4 milhões de postos de trabalho, sendo 673 mil empregos diretos, 1,3 milhão de vagas indiretas e 2,4 milhões de empregos resultantes do efeito renda (BRASIL, 2013; ABRAF, 2013) e foi responsável por aproximadamente US\$ 11 bilhões das exportações do país no ano de 2015 (SNIF, 2016). Outro país em que a indústria florestal exerce grande influência é o Canadá. No ano de 2014 a atividade florestal colaborou com CAD\$ 30,8 bilhões (NRC, 2016) no total das exportações canadenses e com CAD\$19,9 bilhões do PIB (FPAC, 2015). O Canadá aparece como terceiro maior produtor mundial de celulose e sétimo maior produtor de papel, os maiores produtores são China e Estados Unidos para os dois produtos (IBA, 2014).

A cadeia de produção florestal possui uma gama abrangente de produtos comercializáveis, divididos de maneira geral, em produtos madeireiros e não-madeireiros. O primeiro grupo inclui, de acordo com Bacha (2004), produtos primários, reunindo a madeira em forma de cavaco e tora, bem como lenha e carvão; madeira serrada, painéis do material e polpa e papel; além de produtos de maior valor agregado, como por exemplo móveis de madeira. Os produtos não-madeireiros podem ser definidos como todo material biológico (além da madeira bruta) passível de ser extraído de ambientes naturais ou manejados, e serem utilizados para uso doméstico ou comercial, por exemplo a utilização de plantas para alimentação, o uso de ecossistemas para recreação entre outros (WICKENS, 1991). A cadeia de suprimentos desta indústria é classificada como divergente, diferente da grande parte das indústrias, ou seja o número de produtos multiplica-se ao longo da cadeia de produção

(RÖNNQVIST, 2003; D'AMOURS; RÖNNQVIST; WEINTRAUB, 2008; VAHID *et al*, 2014).

De acordo com Radkau (2012) a madeira é usada como matéria prima para placas sólidas e de fibras; vigas; na indústria química e na fabricação papel desde a metade do século XIX. Porém, segundo o mesmo autor, somente no século XX, e em alguns setores apenas em suas décadas finais, a industrialização consolidou-se na indústria florestal. Para Lehoux *et al.* (2012), a fim de superar a concorrência e melhorar o serviço de atendimento ao cliente a indústria de produtos florestais precisa mudar seu modo de fazer negócio, focando na demanda do cliente enquanto otimiza o uso dos recursos utilizados e coordena as atividades operacionais envolvidas para tal.

Para racionalizar os recursos utilizados pelo setor, sejam estes mão de obra, matéria-prima, tempo ou outros, é possível fazer uso da Pesquisa Operacional (PO) e suas técnicas na tomada de decisão dos gestores florestais. Foulds (1988) e Rönnqvist (2003) comentam que o uso da PO para a resolução de problemas florestais acontece há mais de 40 anos. Bare *et al.* (1984) trazem uma revisão sobre o estado da arte da PO, ou ciência da gestão, no planejamento florestal desde a década de 60, contemplando pesquisas sobre manejo de talhões, proteção florestal, aquisição de matéria prima, entre outros.

Com este estudo busca-se a aplicação das técnicas de PO de forma a atender características e restrições encontradas junto à indústria florestal canadense, apresentando um modelo adaptado para as condições encontradas no ambiente supracitado, mas passível de adaptação a diferentes perfis locais.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A cadeia de suprimentos da indústria florestal pode ser entendida como uma grande rede de unidades de produção que gradualmente refinam a madeira em produtos consumíveis. Entre estes produtos têm-se a polpa celulósica e o papel. A produção de polpa e papel é feita através de três

processos principais a saber, colheita florestal, produção da celulose e produção do papel. Na colheita as árvores são derrubadas e após a retirada de seus galhos são transformadas em toras. As toras são então transportadas do campo diretamente para as fábricas ou então para um local de estocagem intermediário. Para a produção da polpa as toras são transformadas em cavacos (pequenos pedaços de madeira resultantes da trituração da mesma), que passam por processos químicos, conhecidos por polpação, para a separação da lignina da celulose (PÉCORA; RUIZ; SORIANO, 2015). A polpa kraft, resultado desta etapa, pode então ser submetida à processos de branqueamento. Por fim a polpa (kraft e/ou branqueada) é transformada em papel.

Como a cadeia de suprimento pode ser muito complexa, possuindo muitas etapas envolvidas e conectadas, Fleischmann, Meyr e Wagner (2005) propõem o uso de quatro etapas principais a fim de simplificação. A primeira é a etapa de aquisição de matéria-prima, incluindo os subprocessos para o fornecimento de recursos para a produção. A produção é a etapa seguinte, em que a matéria-prima, no caso a madeira, é convertida em produtos intermediários ou até mesmo final. Segue-se para a etapa de distribuição, que faz a ligação entre os locais de produção e seus consumidores. Por fim tem-se a etapa que contempla o processo de vendas, o qual através de suas previsões de demanda guia todos os processos logísticos anteriores.

O problema abordado no presente trabalho lida com subprocessos incluídos no processo de aquisição de matéria-prima, sendo considerado como cliente final uma empresa produtora de polpa e papel, localizada na província de Québec, Canadá.

O transporte representa muitas vezes o principal elemento dos custos logísticos de grande parte das indústrias. A indústria florestal não foge a este padrão. O transporte é uma das atividades mais onerosas para a empresa florestal, com diversos fatores afetando seu desempenho, como o tipo de veículo utilizado, a rede rodoviária florestal, condições locais e a distância percorrida entre área de produção e fábricas (BERGER *et al.* 2003). Entre as condições locais que afetam o desempenho do transporte, tem-se como

exemplo o papel que os rigorosos invernos exercem sobre o deslocamento de insumos e produtos na indústria florestal canadense. Alcançando temperaturas tão baixas em que o solo congela a profundidades de até 3,0 m por períodos de 4 meses. Com o incremento de temperatura ao longo do tempo ocorre o degelo da sua base do pavimento, reduzindo assim resistência da malha rodoviária do país. Este decréscimo na robustez do solo leva o governo provincial a implementar políticas de restrição de cargas durante o período de degelo a fim de evitar danos causados pelo tráfego de carros pesados nas estradas. Estas restrições acabam por aumentar o custo de transporte enquanto estão ativas, gerando um custo adicional para a indústria.

Além dos custos inerentes a esta etapa logística, outro fator torna-se oneroso durante o processo de condução da carga florestal até seu destino, o teor de umidade presente na madeira. Na árvore a madeira se forma em um ambiente saturado de água. Esta característica aumenta os custos de transporte do material, fazendo com que se carregue mais água do que a matéria-prima em si.

Em meio a este cenário levanta-se o questionamento, de que maneira é possível organizar e racionalizar as operações relacionadas a etapa de aquisição da matéria-prima florestal, gerando economia para a empresa tomando em conta as políticas de restrição de carga sazonais e da madeira?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor um modelo de otimização para o problema de planejamento da etapa de aquisição florestal canadense, inserindo em sua formulação os efeitos sobre os custos de transporte da característica de perda de umidade da madeira, e do processo de degelo comum à região.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral deste estudo seja alcançado são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar e descrever o cenário em que a empresa problema está inserida;
- b) Desenvolver o modelo conceitual para o problema pesquisado;
- c) Coletar os dados de entrada para o modelo;
- d) Fazer a proposição de um modelo matemático que atenda às características do problema;
- e) Aplicar o modelo proposto;
- f) Verificar a viabilidade deste modelo, comparando com os resultados obtidos com a utilização do modelo transporte apresentado para o cenário atual.

1.3 JUSTIFICATIVA

O estudo apresentado, por fazer uso de modelos matemáticos exatos enquadra-se na grande área da Engenharia de Produção conhecida por Pesquisa Operacional, e contribui também para a área de Logística por estudar parte da cadeia de suprimentos de uma empresa florestal. Sendo assim, justifica-se a motivação para o desenvolvimento desta pesquisa dentro da área de PO, em específico na linha de Métodos da Pesquisa Operacional do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Paraná.

Para a indústria florestal contribui com a criação de um modelo adaptado à suas necessidades, incluindo características e particularidades muitas vezes negligenciadas por modelos mais genéricos. Com isso busca otimizar processos onerosos para o setor, como o transporte de material, facilitando assim uma melhor gestão dos recursos disponíveis.

Ainda justifica-se a elaboração desta dissertação por trazer benefícios ambientais. Com a secagem da madeira em pátios de armazenagem a quantidade de viagens necessárias para transportar a mesma quantidade de madeira diminui como consequência da redução de volume e peso pela perda de água, havendo portanto redução na emissão de gases de efeito estufa ao meio ambiente, produzidos pela queima de combustíveis.

Por fim, por partir de problemas clássicos da Pesquisa Operacional, como o de transporte e de localização-alocação, é capaz de ser aplicado para outros cenários, com as devidas adaptações, trazendo com isso contribuição para o meio acadêmico.

1.4 LIMITAÇÕES

Uma das limitações que permeiam esta pesquisa é a determinação de alguns dos custos inerentes ao processo, os quais não estavam inclusos no banco de dados fornecido pela empresa cujo cenário é o foco deste estudo. Desta forma os custos obtidos ao final dos testes não refletem fielmente a conjuntura real encontrada na empresa.

Outra limitação encontrada está na previsão da perda de umidade pela madeira enquanto estocadas, pois não se leva em conta as diferentes espécies utilizadas pela empresa, fazendo esta estimativa de forma genérica, bem como as condições climáticas locais são avaliadas de forma global e não individualizadas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, incluindo esta introdução.

O Capítulo 2 traz o referencial teórico, contemplando o planejamento da cadeia de suprimentos florestal em seus diferentes níveis (estratégico, tático e operacional), bem como definições sobre aspectos relevantes para a compreensão do problema, e.g. o enfraquecimento da malha rodoviária causado pela ação do degelo e a umidade na madeira.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia a ser utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

O Capítulo 4 traz os resultados obtidos neste estudo, o modelo matemático proposto, os resultados alcançados com testes computacionais e discussão.

Por fim, o Capítulo 5 traz as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

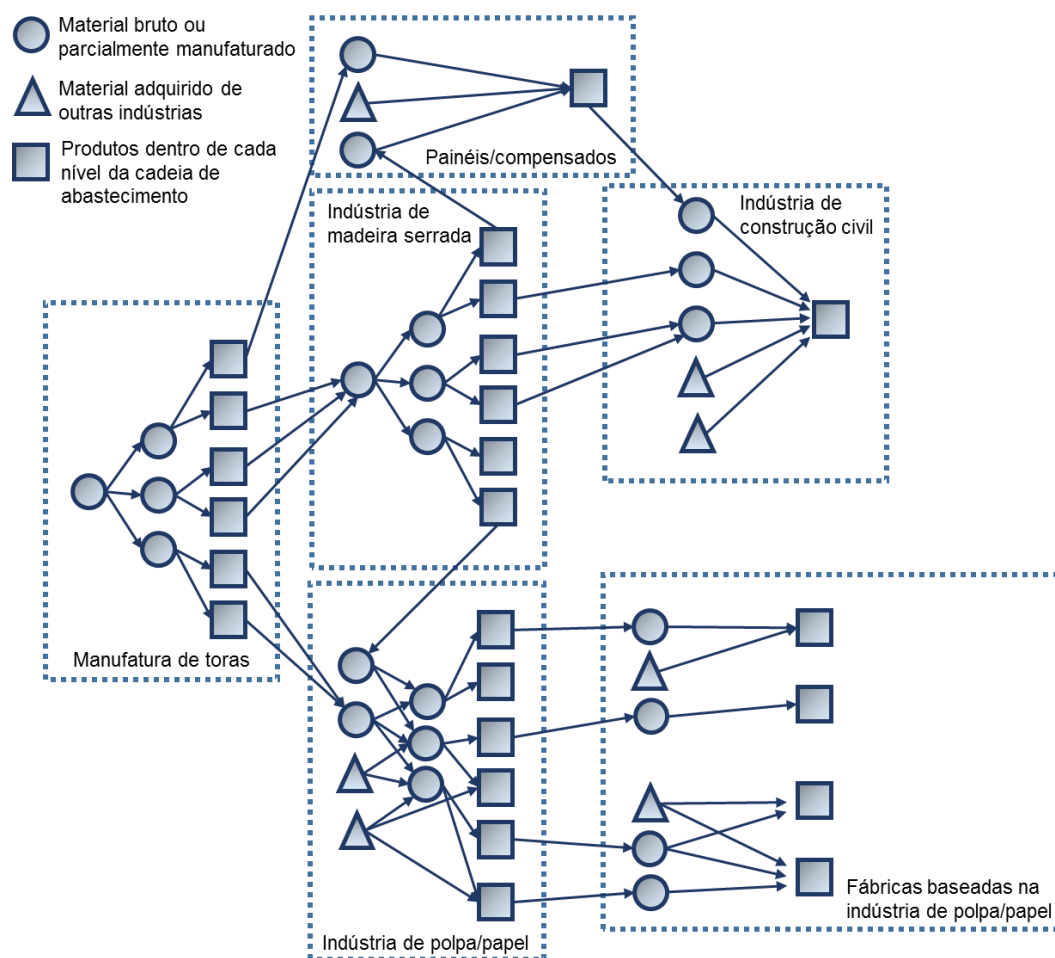
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PLANEJAMENTO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Cadeias de suprimentos, em inglês *supply chains*, são definidas de acordo com Gaudreault *et al.* (2010) como, redes globais de organizações em que material e informação fluem em diversas direções, dentro e através das fronteiras organizacionais, por meio de complexas redes de negócios de fornecedores, fabricantes e distribuidores até o consumidor final. Com uma rede tão intrincada o gerenciamento da cadeia de suprimento torna-se importante para organizações. O termo *Supply Chain Management* (SCM) – gerenciamento da cadeia de suprimentos – surgiu no fim da década de 80 e teve seu uso difundido nos anos 90 (HUGOS, 2011), seu objetivo é maximizar a satisfação dos clientes com o menor custo possível, melhorando a competitividade da cadeia de suprimentos como um todo, através da integração de suas unidades organizacionais e organização de seus fluxos (STADTLER, 2005).

A indústria de base florestal, distintamente das indústrias de manufatura tradicionais que possuem uma estrutura convergente, é composta de diferentes unidades as quais são restringidas por processos divergentes (Figura 1), isto representa um grande desafio no planejamento da cadeia de suprimento do setor (GAUDREAUULT, 2010).

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DO AMBIENTE DIVERGENTE ENCONTRADO EM INDÚSTRIAS DE BASE FLORESTAL.



Fonte: Adaptado de LEHOUX *et al.* (2012).

Em face ao nível de complexidade encontrado, pode não ser possível incluir no planejamento da cadeia de suprimentos todos os detalhes encontrados em ambientes reais, sendo assim modelos criados a partir da abstração da realidade são utilizados como base para se estabelecer um plano (FLEISCHMANN; MEYR; WAGNER, 2005). É possível para a criação destes planos decompor a rede da cadeia de suprimentos completa em cadeias menores, para quatro processos principais – aquisição, produção, distribuição e vendas – com incumbências diferentes (FLEISCHMANN; MEYR; WAGNER, 2005). Pode-se encontrar estes quatro processos e suas respectivas cadeias na matriz de planejamento da cadeia de suprimentos, em inglês *Supply Chain Planning Matrix* (SCP-Matrix). De acordo com os autores, as tarefas da matriz podem ser classificadas em duas dimensões, a saber, horizonte de planejamento, e processos da cadeia de suprimentos, a primeira dimensão é

segmentada em planos de longo, médio e curto prazo, enquanto a segunda dimensão se divide nos processos encontrados nas cadeias de suprimento, aquisição, produção, distribuição e vendas. A Figura 2 apresenta a matriz de planejamento da cadeia de suprimentos para uma indústria de celulose e papel.

A etapa de aquisição, segundo Fleischmann, Meyr e Wagner (2005), contém os subprocessos que fornecem recursos necessários na produção; já a distribuição faz a ligação entre o local de produção e os clientes. Ao se tratar do horizonte de planejamento quanto mais baixo o nível de planejamento mais restritas estão as seções da cadeia, ou seja as decisões no nível operacional (curto prazo) são restringidas pelo planejamento feito no nível tático (médio prazo), que por sua vez é limitado pelo nível estratégico (longo prazo) (D'AMOURS; RÖNNQVIST; WEINTRAUB, 2008).

FIGURA 2 - MATRIZ DE PLANEJAMENTO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL



FONTE: Adaptado de D'AMOURS; RÖNNQVIST; WEINTRAUB (2008).

2.2 PLANEJAMENTO FLORESTAL

Distribuir os recursos disponíveis dentro das restrições existentes, de maneira que as necessidades dos gestores das empresas florestais e seus clientes sejam satisfeitas faz parte da finalidade do planejamento florestal (SPIECKER, 1975). Todos os níveis de planejamento (curto, médio e longo prazo) devem estar bem alinhados, pois decisões estratégicas implicam em limitações impostas as decisões táticas, que por sua vez limitam as operacionais (D'AMOURS; RÖNNQVIST; WEINTRAUB, 2008).

A PO e suas ferramentas são utilizadas para auxiliar no planejamento florestal desde a década de 60, colaborando com os gestores a cerca de 50 anos (BARE, et al., 1984). A PO como forma de ciência, teve origem na Segunda Guerra Mundial com a necessidade de determinar a alocação de recursos durante as operações militares (HILLIER, et al., 1974). Sua consolidação, de acordo com Pizzolato e Gandolpho (2013), veio com a publicação do Método Simplex para a Programação Linear (PL) por George Dantzig no ano de 1947. Segundo Chaves (2011), pode-se entender o conceito de PO como a busca do melhor aproveitamento de recursos e processos através da aplicação de métodos e conceitos científicos. Gass e Assad (2004) concluem que PO é a ciência da tomada de decisão, a ciência das escolhas. Ao longo destes mais de 50 anos de pesquisas a PO foi aplicada a diversas áreas do conhecimento, entre elas cita-se a indústria automobilística (BRASIL *et al*, 2013), saúde (SCARPIN *et al.*, 2008; YADAV, 2010), planos de evacuação (REGNIER, 2010), controle de catástrofes (BERKOUNE *et al.*, 2012). Nesta revisão são apresentados alguns casos do uso da pesquisa operacional no planejamento florestal.

Rönnqvist (2003) apresenta a seguinte estrutura de classificação para os níveis de planejamento florestal (Quadro 1):

QUADRO 1 - NÍVEIS DE PLANEJAMENTO NA CADEIA DE SUPRIMENTOS FLORESTAL.

Nível de Planejamento/ Classe de Decisões	Manejo Florestal e colheita	Transporte e roteirização	Produção
Planejamento Estratégico (> 5 anos)	Plano de colheita a longo prazo	Construção de estradas, modernização da rede viária, gestão de frotas	Planejamento de investimentos
Planejamento Tático (6 meses a 5 anos)	Plano de colheita anual	Melhoramento de estradas, utilização de equipamentos	Plano anual de produção
Planejamento Operacional (1 dia a 6 meses)	Agendamento de equipes, Sequenciamento de derrubada	Áreas de captação, planejamento de transporte	Planejamento da produção

FONTE: Adaptado de RÖNNQVIST (2003).

Desse modo, a presente revisão sobre planejamento florestal encontra-se estruturada da seguinte forma, baseada na divisão apresentada (Quadro 2), seguida por trabalhos relacionados ao planejamento da etapa de aquisição na indústria florestal.

QUADRO 2 – ESTRUTURA PROPOSTA PARA A APRESENTAÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO DA PESQUISA.

Nível de Planejamento	Classe de Decisão	Título	Ano	Autores
Estratégico	Manejo Florestal	<i>Improving computational capabilities for addressing volume constraints in forest harvest scheduling problems.</i>	2007	VIELMA, J. P.; MURRAY A. T.; RYAN, D. M.; WEINTRAUB, A.
		<i>Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters.</i>	2010	ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O.
		<i>Risk-sensitive planning support for forest enterprises: The YAFO model.</i>	2013	HÄRTL, F.; HAHN, A.; KNOKE, T.
	Construção de Estradas e Transporte	<i>FlowOpt – A decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry.</i>	2005	FORSBERG, M.; FRISK, M.; RÖNNQVIST, M.
		<i>Optimal forest transportation with respect to road investments.</i>	2005	OLSSON, L.; LOHMANDER, P.
		<i>Optimal transportation of logs and location of quay facilities in coastal regions of Norway.</i>	2013	NØRSTEBØ, V. S.; JOHANSEN, U.
	Áreas de Conservação	<i>Optimal control for forest management and conservation analysis in dehesa ecosystems.</i>	2013	CERDÁ, E.; MARTÍN-BARROSO, D.
		<i>Mathematical optimization ideas for biodiversity conservation.</i>	2013	BILLIONNET, A.
		<i>How reserve selection is affected by preferences in Swedish boreal forests.</i>	2014	LUNDSTRÖM, J.; ÖHMAN, K.; RÖNNQVIST, M.; GUSTAFSSON, L.
Tático	Plano Anual de Colheita	<i>A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation.</i>	2003	ANDALAFT, N.; ANDALAFT, P.; GUIGNARD, M.; MAGENDZO, A.; WAINER, A.; WEINTRAUB,

Continua

				A.
		O problema da consideração de restrições de adjacência em um planejamento florestal.	2003	ALONSO, L. R. L.
		Planejamento florestal espacial.	2009	GOMIDE, L. R.
		<i>Annual planning of harvesting resources in the forest industry.</i>	2010	BREDSTRÖM, D.; JÖNSSON, P.; RÖNNQVIST, M.
	Melhoramento de Estradas e Transporte	<i>A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation.</i>	2003	ANDALAFT, N.; ANDALAFT, P.; GUIGNARD, M.; MAGENDZO, A.; WAINER, A.; WEINTRAUB, A.
		<i>FlowOpt – A decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry.</i>	2005	FORSBERG, M.; FRISK, M.; RÖNNQVIST, M.
		<i>Optimization models for forest road upgrade planning.</i>	2007	HENNINGSSON, M.; KARLSSON, J.; RÖNNQVIST, M.
		<i>Forestry management under uncertainty.</i>	2011	ALONSO-AYUSO, A.; ESCUDERO, L. F.; GUIGNARD, M.; QUINTEROS, M.; WEINTRAUB, A.
	Plano Anual de Produção	<i>The value of sales and operations planning in oriented strand board industry with make-to-order manufacturing system: Cross functional integration under deterministic demand and spot market recourse.</i>	2008	FENG, Y.; D'AMOURS, S.; BEAUREGARD, R.
		<i>Furniture supply chain tactical planning optimization using a time decomposition approach.</i>	2008	OUHIMMOU, M.; D'AMOURS, S.; BEAUREGARD, R.; AIT-KADI, D.; CHAUHAN, S. S.

Operacional	Sequenciamento de derrubada e Agendamento de Pessoal	<i>A tabu search approach for solving a difficult forest harvesting machine location problem.</i>	2007	LEGUES, A. D.; FERLAND, J. A.; RIBEIRO, C. C.; VERA, J. R.; WEINTRAUB, A.
		Metaheurística algoritmo genético na solução de modelos de planejamento florestal.	2009	SILVA, G. F.; PIASSI, L. C.; MORA, R.; MARTINS, L. T.; TEIXEIRA, A. F.; JUNIOR, A. A. B.
		<i>Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimised harvest scheduling.</i>	2012	SMALTSCHINSKI, T.; SEELING, U.; BECKER, B.
	Transporte	<i>Minimization of the wood density variation in pulp and paper production.</i>	2007	PÉCORA, J. E.; RUIZ, A.; SORIANO, P.
		Nova metodologia para resolução de problemas de transporte em casos esparsos.	2012	SILVA, T. C. L.
		<i>Scheduling a log transport system using simulated annealing.</i>	2014	HARIDASS, K.; VALENZUELA, J.; YUCEKAYA, H. D.; McDONALD, T.
	Planejamento da Produção	<i>Optimized on-line process control of bleaching operations with OptCab.</i>	2007	FLISBERG, P.; NILSSON, S.; RÖNNQVIST, M.
		<i>Optimization of production allocation and transportation of customer orders for a leading forest products company.</i>	2008	AYDINEL, M.; SOWLATI, T.; CERDA, X.; COPE, E.; GERSCHMAN, M.
		<i>Scheduling production for a sawmill: A robust optimization approach (et al, 2014)</i>	2014	VARAS, M.; MATURANA, S.; PASCUAL, R.; VARGAS, I.; VERA, J.

FONTE: A AUTORA (2016).

2.2.1 Planejamento estratégico florestal

Planejamentos de longo prazo devem criar as condições para o desenvolvimento da cadeia de suprimentos no futuro (FLEISCHMANN; MEYR; WAGNER, 2005). O planejamento estratégico florestal possui horizontes de planejamento (HP) que variam de cinco anos até rotações de cultura florestal que podem ter mais de 80 anos cada (D'AMOURS; RÖNNQVIST; WEINTRAUB, 2008). Dentro deste nível, encontram-se decisões a ser tomadas de manejo florestal como, plantação, planos de colheita de longo prazo e planejamento de áreas de conservação. Decisões relacionadas a transporte tal qual, construções e melhoramento de estradas, além de gestão de frotas (RONNQVIST, 2003). As principais ferramentas de PO utilizadas no planejamento estratégico são a simulação e a programação linear (WEINTRAUB *et al*, 2007).

2.2.1.1 Manejo florestal

O manejo florestal tem por objetivo administrar os recursos florestais obtendo benefícios econômicos, sociais e ambientais, bem como manter o abastecimento de madeira na cadeia de suprimentos. Vielma *et al* (2007), abordaram o problema de planejamento de colheita florestal com o uso de restrições severas de volume utilizando o “*Cluster Packing Problem*” (CPP) para solucioná-lo. Estas restrições possuíam o objetivo de manter o volume de madeira colhida em um determinado período dentro de uma variação Δ de volume colhido no período anterior (10 anos). Os autores propuseram um modelo de programação inteira mista, e como alternativa de controlar as violações das restrições utilizadas e encontrar soluções inteiras factíveis implementaram a heurística de alocação inteira simples no processo *branch and bound*.

Para a mesma natureza de problema, mas minimizando o perímetro externo das áreas colhidas, Öhman e Eriksson (2010), formularam um modelo

de programação inteira mista com sistema de modelagem AIMMS (*Advanced Interactive Multidimensional Modeling System*). A minimização do perímetro externo faz com que, caso dois talhões adjacentes sejam colhidos no mesmo período, o perímetro total seja reduzido ao ser comparado com duas áreas semelhantes, mas não adjacentes colhidas. Uma consequência desta abordagem é o aparecimento de grandes áreas sem cobertura no longo prazo. Buscando a gestão de florestas de maneira consciente e cada vez mais baseada em decisões lógicas, Härtl, Hahn e Knoke. (2013), apresentaram um modelo de otimização não linear modular. Este modelo teve por objetivo servir de ferramenta de decisão e planejamento auxiliando pesquisadores da área florestal a resolverem diversos problemas sem grandes adaptações. A combinação da análise de risco com simulação de Monte Carlo, opções de classificação e programação não linear foram as maneiras encontradas pelos autores de lidar com o planejamento empresarial. Uma limitação da ferramenta apresentada foi o número restrito de períodos considerado, sete períodos, cada um variando de 5 a 10 anos.

2.2.1.2 Construção de estradas e transporte

Outro setor importante para a indústria florestal, além do manejo e gestão das florestas em si, é o transporte, pois a movimentação de materiais no setor depende das condições do modal de transporte. Em determinados locais as condições climáticas em alguns períodos do ano podem tornar-se um impedimento para o trânsito levando muitas empresas a optarem, inclusive, pelo armazenamento da matéria prima para o abastecimento constante de sua produção. Forsberg, Frisk e Rönqvist. (2005), desenvolveram um novo sistema de suporte à decisão para o planejamento de transporte florestal sueco, em nível estratégico e tático, o “*FlowOpt*”. A utilização do sistema ferroviário, a localização e capacidade dos terminais, bem como a possível troca de material entre empresas foram as decisões estratégicas consideradas. Um modelo de programação linear, na linguagem AMPL (*A Mathematical Programming Language*) foi proposto pelos autores, o qual se mostrou mais

eficiente no momento de analisar estudos de caso quando comparado com sistemas mais antigos.

A qualidade das estradas é um importante fator para a indústria florestal sueca, podendo tornar-se crítico durante o período da primavera, época em que o degelo ocorre e a qualidade do solo torna-se fragilizada. Olsson e Lohmander (2005), apresentam um modelo passível de ser utilizado em um sistema de suporte à decisão (SSD) que otimize o transporte de toras de madeira e investimentos em estradas de cascalho durante um horizonte de planejamento de 10 anos, dividido em períodos de um ano, minimizando o custo para tal. O modelo formulado como um problema de programação inteira mista foi resolvido utilizando o *software* LINGO 6.0, e concentra-se no período de degelo. Três diferentes cenários foram estudados. No primeiro o intervalo de degelo dura três semanas e a demanda por madeira (com casca) é de 1000 m³; o segundo propõe um quadro de 6 semanas e 2000 m³ de demanda; por último tem-se 9 semanas de degelo e 3000 m³ de demanda neste período por ano.

Para o primeiro cenário os autores encontram em poucos segundos a solução ótima, sem a necessidade de fazer uso de métodos heurísticos. Todavia, a partir do segundo cenário para sair dos tempos elevados de processamento computacional foi necessário implementar uma heurística simples. O *software* LINGO 6.0 foi utilizado para encontrar a primeira solução para o problema inteiro misto; esta foi usada como limite superior (*upper bound*) e o *software* foi novamente solicitado para encontrar o menor valor para a solução objetivo (sendo este um problema de minimização). Essa abordagem foi utilizada como método iterativo e usou como limitante um tempo estipulado de 10h de processamento. Para o segundo e último cenários foram encontrados soluções próximas ao ótimo, porém a heurística simples utilizada não diz quão próxima a solução encontra-se do ótimo global.

Nørstebø e Johansen (2013), buscaram determinar em quais locais instalar cais nas regiões costeiras da Noruega. Para a determinação do local ótimo levou-se em conta também a cooperação com outras indústrias importantes. Os dados utilizados para o abastecimento do modelo foram

coletados dos atores relevantes da cadeia de suprimentos a citar: companhias de transporte, associação de donos de florestas, operadores de cais/terminais, administração dos portos. Um modelo de otimização de localização de instalação, que minimiza o custo total dos transportes, operações e investimento nas estruturas dos cais para transporte de madeira foi proposto pelos autores. Sua formulação foi baseada em programação linear inteira mista e também incluiu o problema de transporte. O horizonte de planejamento (HP) considerado possuía 25 anos, dividido em cinco períodos de 5 anos. A localização dos consumidores foi muito importante no momento de definir onde os cais seriam instalados. Todavia, o fator com maior custo identificado foi o transporte via caminhão, sendo a qualidade das estradas o fator de maior importância, tanto para o custo quanto para a localização das instalações.

2.2.1.3 Áreas de conservação

Além disso, pesquisas envolvendo como criar de maneira lógica áreas de conservação têm sido encontradas na PO. Identificar qual a melhor maneira de se determinar quais as áreas ótimas para a criação destes locais, independente da situação é uma tarefa difícil, pois varia com a importância designada para diferentes aspectos da biodiversidade. A manutenção e conservação da biodiversidade (ecossistema, genética e espécies) têm papel importante para a sociedade como na agricultura, turismo entre outros, (BILLIONNET, 2013), estimulando o desenvolvimento de pesquisas nesta área.

Billionnet (2013) utiliza em seu estudo o uso da programação matemática, em especial, modelos lineares e não lineares com variáveis inteiras ou inteiras mistas, como possíveis ferramentas de auxílio na tomada de decisão nas estratégias de proteção à biodiversidade. Dentre os problemas estudados pelo autor cita-se a definição e seleção de reservas naturais. Foram apresentados diferentes modelos para o problema e suas variações, no entanto não houve a criação de cenários para a comparação do desempenho dos modelos. A seleção de reservas consiste na escolha, com o menor custo de áreas para proteção da biodiversidade, a variante proposta pelo autor foi sob

um determinado orçamento, determinar as áreas que protegeriam uma maior quantidade de espécies. Além desta variação ao problema, também foi estudado um cenário em que existem restrições espaciais as quais podem afetar a forma bem como a conectividade das áreas. Billionnet (2013), conclui que estudos envolvendo pesquisadores e profissionais devem ser estimulados para a definição e resolução de modelos realísticos que possam auxiliar na proteção à biodiversidade.

A fim de determinar quais as melhores maneiras de se estabelecer áreas de plantações artificiais e para a regeneração natural de duas espécies de árvores encontradas na pradaria (azinheira – *Quercus ilex* L. e o sobreiro – *Quercus suber* L.), Cerdá e Martín-Barroso (2013) propuseram um modelo de otimização dinâmica. O modelo descrito pelos autores age como uma ferramenta de análise de decisão, modelando áreas de reflorestamento bem como fazendo a simulação de cenários de regeneração de povoamentos nativos. Para validar o estudo, o problema de otimização foi resolvido para dois diferentes locais no sudoeste espanhol, ambos com povoamentos florestais de azinheira e sobreiro. Apesar da pesquisa ter sido realizada para apenas duas espécies, a metodologia, segundo Cerdá e Martin-Barroso (2013), é aplicável para outras silviculturas, dependendo da disponibilidade da informações para realizar a análise de dados. Após a aplicação da metodologia há a sugestão por parte dos pesquisadores de que os subsídios públicos para a conservação das espécies estudadas deve limitar-se aos regimes de regeneração, os quais necessitam de gastos ligeiramente menores dos cofres públicos quando comparado às áreas de reflorestamento regulamentadas. Os autores indicam que a união de otimização e o uso de técnicas de localização geográfica são um caminho promissor para a linha de pesquisa por eles apresentada.

Lundström *et al* (2014), propuseram uma abordagem para determinar novas áreas de conservação envolvendo programação por metas e compararam com o modelo comumente utilizado (programação linear). Para este trabalho foram entrevistados oito especialistas da área de conservação do conselho administrativo da floresta boreal sueca e definidos pesos para alguns indicadores utilizando um processo de análise hierárquica. Foi dado enfoque para a distribuição de idade, pois as políticas de conservação suecas focam,

atualmente, apenas em florestas antigas. Para a formulação do modelo foi utilizada a linguagem AMPL e dados do Inventário de Florestas Nacionais Sueco o abasteceram. O uso de pesos para indicadores de biodiversidade afetou a composição das áreas selecionadas para novas reservas, por exemplo, a proporção de florestas com menos de 15 anos selecionadas pelo modelo de programação por metas variou entre 32% - 60%, enquanto com o modelo de programação linear a proporção foi de 80%.

2.2.2 Planejamento tático florestal

Planejamentos táticos ou de médio prazo, representam a ligação entre o planejamento estratégico e o operacional, traduzindo as decisões feitas no nível estratégico em objetivos viáveis no operacional (CHURCH, 2007). Segundo Rönqvist (2003), o planejamento tático possui HP que variam de seis meses a cinco anos. Dentre as decisões abordadas citam-se em termos de manejo florestal os planos anuais de colheita. Com relação ao planejamento de transporte, encontram-se o melhoramento de estrada e a utilização de equipamentos, e também, plano anual de produção referente às decisões de produção.

2.2.2.1 Plano anual de colheita

O artigo apresentado por Andalaft *et al* (2003), trabalhou o problema de planejamento da cadeia de suprimentos na indústria madeireira. Com horizonte de planejamento (HP) de dois a cinco anos, as decisões tomadas durante o planejamento se referiam à quais áreas realizar a colheita em cada período, a quantidade de madeira produzida a fim de satisfazer a demanda para exportação de toras, serrarias e plantas de produção de papel. A floresta, pertencente à uma empresa chilena, é composta de pinus, os quais na região atingem idade própria para corte entre 22 e 28 anos. As áreas de colheita foram consideradas homogêneas e definidas pelas características do solo,

idade das árvores e volume disponível por hectare. Um modelo de programação linear inteira mista foi desenvolvido. A relaxação Lagrangeana foi utilizada para decompor o problema em componentes simplificados. O modelo foi testado para uma situação encontrada em uma indústria chilena real e rodado no CPLEX. A formulação proposta obteve boas soluções em tempo razoável até para problemas mais complexos.

Uma resolução para o problema de planejamento de colheita florestal fazendo uso de restrições de adjacência foi proposta por Alonso (2003). A utilização destas restrições possui importância ambiental, pois evita que grandes áreas sejam descobertas, evitando a erosão. Além disso, faz com que a área de abertura máxima permitida pela legislação brasileira de 600 hectares de faixa contínua seja respeitada. As restrições foram utilizadas em três situações distintas: quando não se deseja colher talhões vizinhos em um mesmo período; a fim de impedir a colheita de talhões vizinhos em períodos consecutivos; e para impedir a colheita de talhões vizinhos e talhões distantes em um mesmo período. O horizonte de planejamento foi dividido em 10 períodos. Para a resolução do problema foi formulado um modelo de programação linear binária, o software LINGO foi utilizado para resolução do problema, e nas três situações estudadas o modelo apresentou-se eficaz.

Gomide (2009), em sua pesquisa buscou estudar o problema de agendamento da colheita florestal, em cinco fazendas no município de Caçapava-SP. Para isso foram criados 32 cenários, divididos em quatro casos submetidos a diferentes restrições, o primeiro chamado de “planejamento florestal tradicional” e os três restantes denominados de “planejamento florestal espacial”. A resolução de todos os cenários foi feita pelos seguintes métodos: Algoritmo Genético (AG), *Simulated Annealing* (SA) e programação linear inteira (PLI), sendo posteriormente comparados. As restrições de adjacência testadas foram do tipo *Area Restriction Model* (ARM), comparando também os efeitos de dois limites de área (50 e 70 hectares – ARM50, ARM70) e *Unit Restriction Model* (URM). Os parâmetros utilizados para a análise dos resultados do efeito destas restrições foram a produção volumétrica de madeira e o valor presente líquido (VPL). As outras restrições, utilizadas em todos os casos, são de integridade e controle volumétrico. O planejamento florestal espacial

apresentou redução da VPL em todos os casos quando comparado ao planejamento tradicional. Com relação aos métodos matemáticos aplicados, o tempo de processamento das metaheurísticas foi inferior ao de PLI, fornecendo soluções factíveis em tempo viável, e entre elas a AG se mostrou mais eficaz na maioria dos cenários. Quanto às restrições, a utilização de restrições URM reduziu em maior grau a VPL e produção volumétrica de madeira que as do tipo ARM, e dentro da ARM, quando se aumenta o limite da área de adjacência tem-se um aumento da produção volumétrica bem como da VPL.

O planejamento anual de recursos para a colheita florestal, testado em uma empresa florestal sueca foi proposto por Bredström, Jönsson e Rönnqvist (2010). O problema foi resolvido em duas fases, integrando a designação das equipes de colheita para determinadas áreas a serem exploradas e o agendamento do movimento entre essas áreas. A união destas duas fases foi feita por meio da introdução de um componente de custo, que controla a distância percorrida na primeira fase. Os resultados obtidos pelos autores geraram boas soluções em um curto espaço de tempo, 20 minutos no cenário estudado por eles. O programa de otimização utilizou o AMPL e o CPLEX, integrado ao Excel, como plataforma de adição e saída de dados.

2.2.2.2 Melhoramento de estradas e transporte

Andalافت *et al* (2003), em seu estudo, além de abordar o planejamento da colheita, faz a integração desta com o planejamento da construção e melhoramento de estradas. Os autores citam que dentro das áreas pertencentes à empresa são necessárias estradas privadas, mesmo grande parte dessas áreas estando próximas as estradas públicas pavimentadas. As decisões relativas ao transporte em cada período na pesquisa são: quais estradas serão construídas; se essas serão de terra batida ou asfalto; ou quais estradas serão melhoradas (passarão de terra à asfalto). A qualidade da estrada afeta os custos da empresa. Os caminhos asfaltados possuem custo mais elevado, no entanto, com eles o gasto com transporte pode ser

minimizado a longo prazo, podendo ser utilizados durante todo o ano, enquanto as estradas de terra possuem seu uso restrito ao verão.

No estudo de caso, feito em uma empresa chilena, modificações foram aplicadas ao modelo para que fosse possível chegar em bons resultados, como a relaxação Lagrangeana, modificação das capacidades e a adição e aumento de restrições. Os autores concluem que nenhuma das modificações aplicadas isoladamente seriam capazes de alcançar as melhorias obtidas com o uso das mesmas em conjunto, sendo que todas foram necessárias para obtenção de bons resultados na maioria dos cenários. Forsberg, Frisk e Rönnqvist (2005) em relação ao nível tático para o modelo previamente citado, avaliam quais áreas de origem e demanda de abastecimento seriam atendidas e a possibilidade da utilização de rotas em que o caminhão volte carregado.

Henningsson, Karlsson e Rönnqvist (2007), abordaram o melhoramento de estradas do ponto de vista das empresas florestais, disponibilizando áreas de colheita o ano inteiro, com um horizonte de tempo de 10 anos. O objetivo dos autores foi a criação de modelos e métodos de otimização para serem utilizados em um SSD no melhoramento de estradas. Dois modelos de programação linear inteira mista foram apresentados, o modelo A corresponde a um modelo direto, incluindo decisões sobre o fluxo de ligação. No modelo B, as decisões do fluxo da madeira são definidas como rotas de origem e destino. Ambos os modelos foram testados em um estudo de caso aplicado a uma indústria sueca, correspondente a uma rede dispersa com apenas um ponto de demanda. O tempo de resolução para ambos os modelos testados foram bons. O modelo B, segundo os autores, mesmo correspondendo a uma restrição do modelo A, apresentou um resultado um pouco melhor da função objetivo quando comparado ao último. Os autores esperavam encontrar resultados menos significativos para o modelo B, pois um número limitado de rotas é considerado podendo dessa forma, excluir um bom resultado, o que não acontece em função da estrutura esparsa da rede estudada.

Alonso-Ayuso *et al.* (2011), analisam o problema de colheita de madeira e construção de estradas sob incerteza, a aleatoriedade de preços de venda da madeira, no Chile. Para isso apresentam um modelo multi-estágio baseado em

programação estocástica inteira binária mista, resolvido pelo algoritmo “*branch and fix*”. O objetivo do modelo foi determinar a política de colheita e acesso rodoviário ideal que maximizaria o lucro líquido esperado respeitando as restrições impostas, com HP de quatro anos. O modelo foi testado com os dados de uma floresta do Chile, pertencente a uma grande empresa chilena, e rodado no CPLEX. Os resultados foram obtidos após 8 horas e 20 minutos, o que estimulou a implementação do método “*branch and fix*” para a solução ótima. O algoritmo foi capaz de encontrar a solução ótima em menos de quatro horas, sendo mais satisfatório que a abordagem direta.

2.2.2.3 Plano anual de produção

A cadeia de suprimentos do processo de produção de móveis abrange os fornecedores de madeira, serrarias, secagem da madeira já processada, indústria de móveis, armazéns de estocagem, varejistas, terceirizados e o consumidor final. Ferramentas de tomada de decisão são importantes para que o desempenho operacional seja melhorado na indústria moveleira, para isso, novos modelos que auxiliem neste processo são muito importantes. A descrição de um modelo que auxilie no planejamento tático da indústria de móveis foi proposto por Ouhimmou *et al.* (2008), o qual descreve o planejamento de médio prazo e auxilia no planejamento tático da empresa.

O sistema de tomada de decisão ajuda o responsável pelo planejamento a antecipar o processo de planejamento operacional, planejar as operações ao longo de sua cadeia de suprimentos e até enfrentar situações como mudança da necessidade dos clientes, falha na entrega da madeira pelo fornecedor, etc. O horizonte considerado na modelagem foi de um ano, pois reflete a sazonalidade da aquisição, produção e demanda. Dois métodos foram testados, um problema de programação inteira mista, resolvido pelo CPLEX com tolerância de otimalidade de 1%, e por um algoritmo heurístico baseado na decomposição de tempo sobre o horizonte de planejamento. A solução obtida pela heurística proposta foi melhor do que a encontrada pelo CPLEX para o mesmo período de tempo. Durante a validação do modelo para um caso real, o

problema completo demorou aproximadamente 2 horas para chegar próximo da solução ótima com a heurística, enquanto o CPLEX não encontrou solução factível após dois dias. Os resultados obtidos pelos autores foram comparados ao processo de planejamento da empresa do período de 2004 - 2005, e a solução encontrada pelo sistema proposto foi capaz de reduzir em mais de 22% os custos totais de operação.

Feng, D'Amours e Beauregard (2008) dizem que uma etapa importante nos planos de produção é o planejamento de vendas e operações (PV&O), o qual faz parte do planejamento tático das empresas, e é realizado para balancear a demanda e suprir as capacidades de produção, distribuição, aquisição e finanças. Assegura que os planos e performances de todas as funções de negócios estejam alinhadas ao planejamento estratégico da companhia e possui, em geral, horizonte de planejamento mensal. Duas abordagens de PV&O são diferenciadas pelos autores, uma baseada na cadeia de suprimentos, que integra a função cruzada de vendas, produção, distribuição e aquisição no processo de planejamento, e outra baseada em vendas-produção, em que o planejamento das vendas e a produção é feito junto e a distribuição e aquisição separadamente. Além disso, um modelo para planejamento dissociado também foi feito. Foram desenvolvidos modelos que representam estas três abordagens. Os dados de demanda e preços de mercado foram gerados pela plataforma experimental FOR@C. Os modelos de programação inteira mista foram formulados utilizando a linguagem de programação otimizada OPL e resolvidas pelo CPLEX. Todos os modelos apresentados foram escritos para um caso em que o preço mercado e a demanda são determinísticos. Para validação dos modelos os autores realizaram um estudo de caso em uma empresa produtora de painéis de partículas orientadas com dados de campo. Os resultados mostraram uma performance maior para a abordagem baseada na cadeia de suprimentos e planejamento dissociado, especialmente em um ambiente com variação de demanda e/ou preço de mercado.

2.2.3 Planejamento operacional florestal

O planejamento operacional, diferentemente do estratégico e tático, conduz às atividades reais, as quais estão sendo realizadas (EPSTEIN *et al*, 2007). Os modelos deste nível requerem um grau de detalhamento mais alto e exato pois especificam para as atividades instruções detalhadas para execução e controle imediatos (FLEISCHMANN; MEYR; WAGNER, 2005). Dentre as decisões a serem realizadas, citam-se o sequenciamento de derrubada florestal, agendamento de pessoal, o agendamento de transporte e todas as decisões de transporte deste nível, bem como o agendamento e dimensionamento de lotes. Os horizontes de planejamento variam entre um dia até seis meses (RONNQVIST, 2003).

2.2.3.1 Sequenciamento de derrubada – Agendamento de pessoal

A utilização e designação de equipamentos, além da elaboração da rede de rodovias de acesso são importantes no planejamento florestal. Todavia resolver este problema por meio de abordagens exatas limita sua resolução a problemas de tamanho mediano. A utilização da busca tabu foi testada para superar esta limitação por Legües *et al* (2007). A dificuldade encontrada pelos autores durante a formulação está na existência de dois sub-problemas difíceis a serem resolvidos, o problema de localização de maquinário e o da rede de rodovias. Logo uma modificação da versão tradicional do problema de localização foi feita: sempre que a configuração de localização do maquinário se modificar, a rede de acesso à rodovia correspondente também se alteraria. Como a solução ótima para a rede de rodovias exige muito tempo, foi adotada a estratégia de solução aproximada. Apenas dois tipos de maquinários foram considerados no modelo de busca tabu (*skidders* e torres). Após o fim da busca tabu, em que se determina a localização do maquinário, teve-se início a resolução do problema da rede de rodovias. Os locais em que se decidiu que seria instalado o maquinário e a saída eram nós, os pontos de “Steiner” e os arcos são as estradas. Para analisar as variações propostas, quatro problemas

com complexidade crescente foram propostos, sendo que os dois últimos possuíam dimensões equivalentes ao encontrado em campo. Os resultados foram comparados ao obtido pelo CPLEX e mostraram que a heurística possui resultados atrativos, obtendo soluções melhores em tempo significativamente menor que às 10 horas permitidas ao CPLEX. O tempo computacional observado para a busca tabu aumentou quase linearmente com a complexidade do problema.

O sequenciamento de corte é outro problema encontrado no planejamento florestal. Da Silva *et al* (2009) analisaram o problema ao estabelecer este sequenciamento para uma floresta implantada subdividida em várias unidades de produção. Definiram-se idades mínimas e máximas de corte, e restrições de atendimento anual de demanda por madeira e da capacidade de substituição de áreas exploradas por novos locais ao longo do horizonte de tempo analisado. Para isso, foi avaliada a eficiência e eficácia da utilização da meta-heurística AG na resolução deste problema comparando aos resultados obtidos por meio do software CPLEX. O problema proposto possuía 50 unidades de produção, 9 anos de horizonte de planejamento, 735 variáveis de decisão, duas conduções de brotação e demandas de 400.000 (anos 0 e 1), 500.000 (ano 2), 600.000 (ano 3), 700.000 (anos 4, 5 e 6) e 800.000 m³ de madeira (anos 7 e 8). O CPLEX gastou uma quantidade de tempo muito inferior para obter a resposta exata ao problema, o que era esperado pelos autores, já que a dimensão do problema proposto não era grande. A expectativa dos mesmos conforme o número de variáveis de decisão cresce é que o tempo de processamento tenha outro cenário, aumentando exponencialmente para o software e em progressão menos acentuada para o AG.

Smaltschinski, Seeling e Becker (2012), propõem o uso da técnica de criação de *clusters* ou agrupamentos nos talhões florestais, para com isso diminuir o movimento de *harvesters*, *forwarders* (equipamentos de colheita) e de pessoal (equipes) na colheita. O método proposto, baseado na árvore geradora mínima, foi desenvolvido e aplicado para a empresa Aracruz (atual Fibria) no ano de 2004. Os talhões foram agrupados de maneira que a distância máxima percorrida entre os talhões de um *cluster* não fosse excedida. Essa distância dependia dos custos de movimentação entre os talhões e da

qualidade das estradas. Os autores concluem que utilizar a técnica de agrupamento conduz a redução dos custos de colheita, pois o tempo de movimentação de equipes e a distância total percorrida podem ser reduzidas.

2.2.3.2 Transporte

Pécora, Ruiz e Soriano (2007) propõem um modelo cujo objetivo é auxiliar no agendamento do transporte de madeira para o abastecimento de digestores de polpa celulósica, minimizando a variação de densidade da madeira. Esta variação prejudica a qualidade tecnológica da polpa produzida podendo consequentemente reduzir o lucro das empresas. A introdução da variação da densidade no modelo normalmente levaria à construção de um modelo não linear, no entanto, foi adotada uma estratégia de linearização permitindo a formulação de um modelo de programação linear inteira. O modelo considera restrições clássicas, como disponibilidade de madeira, mas também inclui restrições específicas da planta de produção, evitando assim, mudanças drásticas entre os períodos de produção. Testes preliminares demonstraram que o método “*branch and bound*” foi capaz de resolver problemas com horizonte de planejamento de até 4 períodos, quando para problemas reais esses períodos variam entre 12 a 16. Para evitar esta desvantagem foi proposta uma heurística baseada no modelo linear inteiro, em que os períodos são decompostos. Os dados para validação do modelo foram oferecidos por uma das maiores produtoras de polpa e papel do Brasil. Foram considerados 3 digestores, cada um produzindo de 5000 m³ à 7000 m³ de polpa celulósica por dia, 24h/dia, 7 dias/semana. O modelo foi testado usando o CPLEX, com um tempo limite para rodar de 10 horas. O teste computacional possuiu dois objetivos: identificar a extensão dos problemas de agendamento da produção de polpa e papel que poderiam ser resolvidos até a eficiência ótima, e qual a seleção dos parâmetros para a formulação da heurística. O método heurístico proposto mostrou-se uma ferramenta eficiente e precisa na resolução do problema.

Silva (2012), em sua tese de doutorado apresenta uma nova metodologia de resolução para o problema de transporte, mais eficiente na resolução de problemas esparsos caracterizados pela falta de ligação entre algumas origens e destinos. A autora cita como exemplo de problema de transporte esparsos, o transporte de madeira retirada dos talhões para os clientes, em que se considera como origem as pilhas formadas e como destino as necessidades de cada cliente. Foi desenvolvido um aplicativo para verificação e aplicação da nova metodologia na linguagem Visual Basic.Net que estava dividido em duas partes: a geração de exemplos aleatórios e a resolução dos problemas. A pesquisa trabalhou apenas com a criação de exemplos aleatórios para a verificação da nova metodologia, resolvendo tanto problemas esparsos quanto densos (em que todas as ligações entre origem e destinos existem), para os problemas densos o tempo de resolução encontrado foi o mesmo do método tradicional, já no caso esparsos o tempo computacional gasto foi de um quarto do tempo gasto pelo método tradicional em problemas de densidade 0,05, tornando viável a utilização da metodologia para resolver qualquer tipo de problema.

O problema de agendamento de caminhões de madeira é amplamente discutido na literatura que trata de gestão de transporte e roteirização (HARIDASS *et al*, 2014). Na indústria florestal os custos com o planejamento de rodovias e transporte podem chegar a 40% dos custos operacionais, logo, estudos que proponham alternativas viáveis e menos custosas para a solução deste problema possuem grande importância monetária para o setor. No entanto, a maioria dos problemas de transporte clássicos trata casos em que o destino final é visitado apenas uma vez, não sendo o caso das madeireiras. Para isso novas metodologias têm sido propostas para a resolução do problema.

Como alternativa os autores descrevem a construção um modelo de otimização baseado na meta-heurística SA. O resultado foi obtido em menos de dois minutos e a solução foi melhor do que conseguida manualmente pelo supervisor encarregado. Além disso, o modelo foi testado para um pequeno problema e um problema prático. Conseguiu-se, no problema prático, uma redução de 28% das distâncias percorridas para o caminhão não-carregado e a

redução em 17% da quantidade total de veículos necessários, sugerindo que o algoritmo desenvolvido possui características suficientes para atender a cadeia de suprimentos florestal.

2.2.3.3 Planejamento da produção

Na indústria de produção de polpa celulósica o gasto com produtos químicos durante o processo de branqueamento é muito alto. A busca por maneiras de melhorar este processo, minimizando desperdícios é de grande interesse. Flisberg, Nilsson e Rönqvist (2007), apresentaram o SSD OptCab, cujo objetivo de auxiliar no controle da adição dos produtos químicos no branqueamento. Dentre as dificuldades encontradas para a implementação citam-se: estabelecer a relação correta entre as cargas químicas e as propriedades dos *inputs* e *outputs* (i.e. alvura, número Kappa) em cada etapa; a não identificação do efeito das decisões tomadas no início do processo pelos operadores que a fizeram, pois a celulose leva mais de 8 horas para passar por toda planta de processamento (tempo de expediente 8 horas) e provar que o processo de otimização funciona convencendo os operadores a usa-lo (RÖNNQVIST, 2012). O SSD foi implementado na empresa sueca Billerud AB, a abordagem de solução proposta possui duas fases. Primeiro dados coletados durante os dias anteriores são utilizados para estabelecer uma descrição detalhada dos processos futuros, assim criando o problema diagnóstico, o qual é resolvido a cada 15 min para assegurar a situação operacional corrente. Com a criação do diagnóstico é formulado, então, um problema não linear de controle, em que as etapas do processo são integradas e os custos dos produtos químicos minimizados, o problema controle é resolvido a cada 5 minutos. O OptCab operou entre os anos de 2004 e 2009, em aproximadamente 98% do tempo, gerando com isso reduções de 10% no uso de insumos para a empresa. Essa redução corresponde a uma economia de 2 milhões de euros, além de um nível de alvura mais estável e redução de impactos ambientais (RÖNNQVIST, 2012).

Aydinel *et al.* (2008), desenvolveram dois modelos de programação inteira mista para otimizar a designação dos pedidos de clientes de uma empresa do ramo florestal, em suas diferentes plantas produtoras com o objetivo de minimizar os custos referentes a produção e transporte. Os modelos foram preparados para serem utilizados pela equipe de vendas da empresa para auxiliar no planejamento de pedidos semanal, foram modelados na plataforma AIMMS e resolvidos no CPLEX. O primeiro modelo identificado pelos autores como 'modo-fixo' (*fixed-mode*), o tipo de transporte utilizado é definido pelo cliente, do modelo espera-se que este decida a designação da produção do pedido; a transportadora; tamanho dos veículos e rota utilizadas. Já o segundo modelo, chamado de 'modo-aberto' (*open-mode*) cabe a empresa (ou seja ao modelo) decidir também qual tipo de transporte será utilizado. Duas semanas de dados foram fornecidos a fim de validar os modelos. A primeira semana incluiu ao todo pedidos equivalentes a 309 vagões de trem e 16 cargas de caminhão; a última semana teve movimento de 208 vagões e 21 caminhões.

Para o primeiro cenário, os autores obtiveram a solução com o 'modelo-fixo' após alguns segundos de processamento, com os custos para designação e transporte reduzidos em cerca de 2%, o que representa um total de CAD\$ 230.000. O 'modelo-aberto' para o mesmo cenário, foi resolvido em 90 segundos, podendo gerar reduções de custo mais de CAD\$ 250.000. No segundo cenário, apenas o 'modelo-aberto' foi testado, demonstrando que até CAD\$ 137.000 poderiam ter sido economizados pela empresa.

O problema descrito por Varas *et al* (2014), considera o material bruto da serraria (toras) e seu produto. O processamento de cada material bruto é associado a um processo de manufatura específico, com tempo conhecido e determinado. A divisão do horizonte de tempo foi feita em períodos (semanas, por exemplo), e esses períodos em sub-períodos (dias). O principal processo decisório do problema é quanto de cada material processar em cada sub-período a fim de satisfazer a demanda de produtos enquanto tenta maximizar o rendimento ou o lucro da empresa. Três modelos robustos foram desenvolvidos para resolver o agendamento de produção de uma serraria chilena, um considerando apenas a incerteza na demanda de produto, outro considerando

a incerteza do suprimento da matéria prima e o último considerando as duas incertezas. Os modelos matemáticos determinísticos foram codificados em AMPL e resolvidos no CPLEX. Possuíam 7 produtos, 6 materiais brutos, e plano de horizonte de 6 períodos e 7 sub-períodos. A performance dos modelos foi determinada utilizando simulação de Monte Carlo.

Os modelos propostos possuem como limitação o fato de serem estáticos, ou seja, todas as decisões devem ser realizadas no início do planejamento. Como alternativa para melhorar existe a possibilidade de utilização de algoritmos em que alguns dos parâmetros sejam liberados ao longo do tempo ou a programação dinâmica estocástica, como sugerem os autores.

2.2.4 Planejamento da etapa de aquisição da indústria florestal

De acordo com Feischmann, Meyr e Wagner (2005), a cadeia de suprimentos da etapa de aquisição inclui subprocessos que fornecem os recursos necessários pela produção, em empresas florestais, como posto por Helstad (2006), isto pode significar a compra de matéria-prima, transporte, planejamento e gestão destes processos.

Palander e Väättäinen (2005), apresentam dois diferentes modelos que descrevem o fluxo de madeira para auxiliar na gestão do planejamento da etapa de aquisição, um compreendo situações de transporte em sentido único e outro incluindo cenários de retorno (*backhauling*). Os custos de transporte e os custos totais de compra de madeira, obtidos pelos autores, foram reduzidos quando fez uso dos cenários com retorno .

O estudo qualitativo da etapa de aquisição da indústria florestal foi realizado por Helstad (2006). O autor fornece quatro dimensões estratégicas chave desta etapa e apresenta um modelo conceitual geral de planejamento da compra de matéria-prima por serrarias, baseado em 46 entrevistas realizadas com pessoas envolvidas neste processo de sete serrarias na Dinamarca, Finlândia e Suécia.

Gautam, Lebel e Beaudoin (2013), em sua pesquisa identificam oportunidades de melhorar a capacidade de uma empresa em detectar mudanças na demanda e sua eficiência em responder a estas mudanças, utilizando o conceito de um sistema de compra de madeira. Após exaustiva pesquisa bibliográfica os autores concluem que futuros estudos devem focar na determinação do nível de investimentos ótimo necessário para maximizar a rentabilidade para a cadeia de suprimento florestal.

Rix (2014), propõe em sua pesquisa duas abordagens para melhorar a etapa de aquisição da cadeia de suprimentos madeireira, o primeiro trata do agendamento de equipes de colheita florestal, resolvido utilizando uma heurística baseada no método *branch-and-price*. O último possui como objetivo resolver o problema de agendamento de caminhões de madeira, resolvido por geração de colunas.

2.3 ENFRAQUECIMENTO DO SOLO CAUSADA PELO DEGELO

Em regiões com invernos rigorosos, encontradas por exemplo nos países nórdicos (Suécia, Noruega, Finlândia, etc), Canadá, algumas regiões dos Estados Unidos, entre outros, é possível encontrar variações térmicas de 70°C ao longo do ano (MTQ, 2015). Com tamanha amplitude a estabilidade estrutural do pavimento rodoviário desses locais é significativamente impactada.

Durante o inverno a rigidez do solo geralmente aumenta devido a ligação de gelo nas partículas do solo na base do pavimento e da formação de lentes de gelo no subleito (terreno situado logo abaixo de um pavimento) (SIMONSEN; ISACSSON, 1999). Ainda segundo os autores, do ponto de vista estrutural as mudanças geradas no inverno não são críticas pois, a capacidade de suporte do pavimento é aumentada. No entanto durante o período de congelamento podem ocorrer fraturas no solo, ou *frost heave* em inglês, as quais ocorrem pelo movimento ascendente do subleito, resultante da expansão

da umidade acumulada no solo quando este congela (Figura 3). (EVERGREEN, 2006)

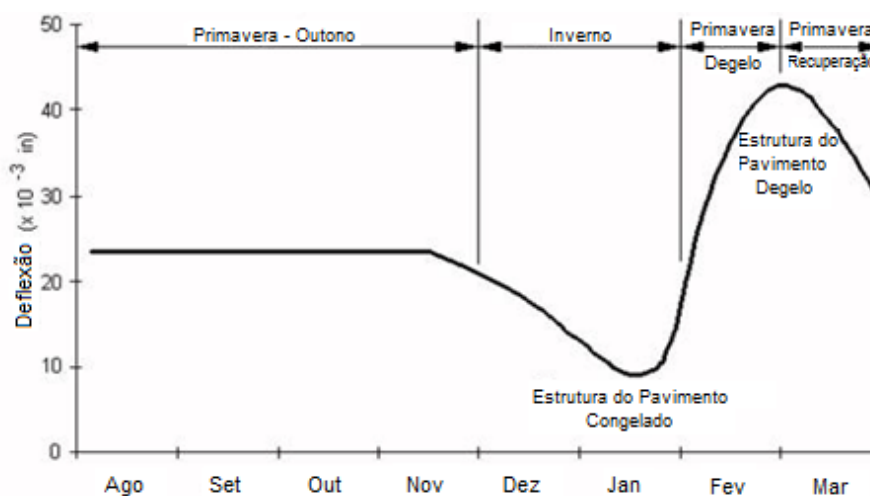
FIGURA 3 – EFEITO DO CONGELAMENTO NO SOLO E PAVIMENTO.



FONTE: Adaptado de MTQ (2015).

Em contraste, o período de degelo, o qual normalmente ocorre na primavera, possui severo efeito na capacidade de sustentação do pavimento, pois causa a saturação do solo com água, gerando uma camada de água presa entre a estrutura rodoviária e o estrato ainda congelado do solo (DUDEJA, 2014). Segundo Simonsen e Isacsson (1999), o processo de degelo ocorre normalmente a partir da superfície do pavimento para baixo, entretanto acostamentos cobertos de neve podem restringir este evento, isto combinado com camadas inferiores ainda congeladas leva ao prolongamento do período de enfraquecimento das estradas. A alta concentração de água, combinada com baixas densidades do solo são responsáveis pelo enfraquecimento da pavimentação e do subleito (DORÉ, 2004). Simonsen e Isacsson (1999) citam que os fatores mais importantes, que afetam o enfraquecimento do solo durante o período de degelo, são o tipo de solo, permeabilidade, condições de drenagem e a taxa de degelo. A força do solo e pavimento é progressivamente recuperada com a drenagem ao longo do tempo (DORÉ, 2004). A Figura 4 ilustra as mudanças na resistência do pavimento ao longo do tempo.

FIGURA 4 – DEFLEXÃO DA PAVIMENTAÇÃO, ILUSTRANDO A MUDANÇA TEMPORAL DA FORÇA DO PAVIMENTO (EM UMA PARTE DA ROTA ESTADUAL 172 NO ESTADO DE WASHINGTON – ESTADOS UNIDOS).



FONTE: EVERGREEN (2006).

Com o enfraquecimento causado por este processo, o tráfego neste período pode causar danos permanentes na superfície rodoviária. De acordo com Hart *et al.* (2012), a carga de veículos em movimento na rodovia comprime a camada de líquido no solo, e faz com que a água, argila e outras partículas finas sejam extrudados através trincas e juntas do pavimento, resultando em rachaduras e sulcos na estrada.

A fim de evitar os danos causados pelo enfraquecimento encontrados durante o período de degelo tipos especiais de pavimento e políticas de restrição de cargas são amplamente utilizados nestas regiões (DORÉ, 2004). Conforme Simonsen e Isacsson (1999), nos países nórdicos como um todo, de 10% - 60% das estradas públicas estão sujeitas a restrições de carga durante o degelo. O custo adicional estimado pela Administração Rodoviária Suéca (*Swedish Road Administration*) de manutenção e de reconstrução de rodovias conforme os autores, à época, corresponde a cerca de 25% do orçamento previsto para manutenção da Agência. Hart *et al.* (2012) citam que nos Estados Unidos, a redução em 20% do peso permitido nas rodovias durante a estação de degelo aumenta a vida útil da pavimentação em 62% e, caso a redução seja de 50% leva ao aumento em 95% da durabilidade da estrada. Os autores ainda mencionam que atrasos na implementação destas restrições em Minnesota, estado americano, geram um aumento de US\$12.000 para para US\$12.500 por

milha por ano no custo rodoviário anual, gerando para o Estado, com a utilização criteriosa das restrições, o potencial para reduzir os custos em aproximadamente US\$15 milhões por ano. A Figura 5 ilustra os danos causados pelo processo de congelamento e degelo nas estradas.

FIGURA 5 – DANO CAUSADO EM ESTRADAS DEVIDO AO EFEITO DE CONGELAMENTO-DEGELO.



FONTE: EVERGREEN (2006).

Na província canadense do Québec, cujo clima e formação pedológica propiciam o enfraquecimento do solo durante o degelo, tornando-o de 30 a 70% mais fraco, as primeiras normas relativas à restrições de carga datam de 1955 (MTQ, 2015). A partir de 1977, segundo o Ministério de Transporte da Província (2015), as datas de início e fim do degelo começam a ser computadas e em 1991 três zonas de restrição de carga são estabelecidas em Québec. A divisão em três zonas (Figura 6) foi realizada levando em conta as características geográficas e climáticas locais, a profundidade habitual de congelamento e a evolução do degelo nas diferentes áreas da Província, bem como a circulação de veículos pesados (MTQ, 2015). Este seccionamento do território em micro-regiões não é feito em maior detalhe (refletindo melhor os microclimas) pois restringiria severamente a mobilidade viária. A redução de peso em Québec varia de 12 a 20%, reduzindo de acordo com o Ministerio de Transporte de Québec (2015), aproximadamente 60% dos danos causados em relação ao um eixo carregado.

FIGURA 6 - MAPA DA DELIMITAÇÃO DAS ZONAS DE RESTRIÇÃO NA PROVÍNCIA DE QUÉBEC – CANADÁ.



FONTE: MTQ (2015).

2.4 UMIDADE DA MADEIRA

A estrutura lenhosa da madeira é formada em um ambiente saturado de água na árvore, que é responsável por manter a madeira elástica e capaz de resistir a estresses ambientais, como ventanias (ROWELL, 2012). A madeira, como muitos materiais naturais, é higroscópica, ou seja, propensa a variações em seu teor de umidade a fim de equilibrar-se com o ambiente (GLASS; ZELINKA, 2010). Esta característica afeta as propriedades mecânicas, elásticas e térmicas da madeira (ROWELL, 2012), além de alterar seu peso e volume, pois até que suas paredes celulares estejam saturadas a absorção de água leva a um afastamento microfibrilar, expandindo as paredes e por consequência, aumentando seu volume (MACHADO, 2006). Logo após o abate da árvore diz-se que a madeira está verde, sua parede celular está saturada e existe água livre nos lúmens, neste estado o teor de umidade encontrado pode ser superior a 100%, ou seja, em uma amostra a quantidade de água em relação a quantidade de material lenhoso é superior em peso (BRAMHALL, 1981; MACHADO, 2006; GLASS; ZELINKA, 2010). Rowell (2010) demonstra por meio da Equação 1, a maneira de calcular o teor de umidade máximo ($TU_{máx}$) na madeira:

$$TU_{m\acute{a}x} = \frac{100 \times (1.54 - d_b)}{1.54 \times (d_b)} \quad (1)$$

Em que d_b é a densidade específica básica da madeira (seu peso seco pelo volume saturado) e 1,54 é a densidade da parede celular do material. Toma-se como exemplo, utilizando a equação apresentada, o teor de umidade máximo para o Paraporá - *Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don, Bignoniaceae - cuja densidade específica é de 310 kg/m³ (0.31 g/cm³) (IBAMA, 1997) é de 257,65%, já para o angelim-vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) com densidade básica de 0.83 g/cm³ (IBAMA, 1997) seria 55,54%. A Tabela 1 apresenta o teor de umidade médio para algumas madeiras verdes:

TABELA 1 – TEOR DE UMIDADE MÉDIO EM MADEIRAS VERDES

Espécie	Teor de Umidade(%)	
	Cerne	Alburno
Aspen	95	113
Birch, Paper	89	72
Cottonwood, Eastern	162	146
Pine, Sugar	98	219
Redwood, Old growth	86	210
Walnut, Black	90	73

FONTE: Adaptado de ROWELL (2012).

A partir do momento da derrubada, a peça de madeira em seu estado verde colocada ao ar, inicia o processo de troca de umidade com o ambiente e gradativamente perde peso, secando (MACHADO, 2006), apenas após atingir o Ponto de Saturação das Fibras (PSF), em média 30%, ocorre a alteração volumétrica da peça (GLASS; ZELINKA, 2010; ROWELL; 2012). A secagem da madeira acontece até o momento em que esta entra em equilíbrio com as condições ambientais locais (MACHADO, 2006), por exemplo, o teor de umidade de equilíbrio de 12% (base seca) pode ser alcançado com a exposição constante da madeira a um ambiente cuja umidade relativa é de 65% e com temperatura de 18°C (NICHOLLS; BRACKLEY, 2009). Este processo é resultado do movimento da água, do centro da madeira para sua superfície, onde a umidade evapora para o ambiente (BRAMHALL, 1981).

Para boa parte de seus usos finais a madeira deve estar seca, este processo traz diferentes benefícios, a saber, as alterações dimensionais que ocorrem com a redução do teor de umidade acontecem antes do uso final da peça; suas propriedades mecânicas e térmicas se elevam; reduz-se a possibilidade do surgimento de manchas causadas por bactérias, mofo e biodegradação da madeira; com a secagem o peso do material diminui e com isso os custos de transporte e manuseio são reduzidos (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Diferentes técnicas de secagem de madeira estão disponíveis industrialmente, tais como, secagem ao ar livre ou natural, em estufas, secagem a baixa temperatura, a vácuo, entre outras. Dentre todas as possibilidades, a secagem natural é o método mais antigo, requer baixo investimento, somente a área destinada para as pilhas de madeira (Figura 7) (BRAMHALL, 1981). No entanto, segundo o autor, a secagem ao ar livre oferece baixas condições de controle do processo e a madeira deve ficar armazenada por longos períodos, especialmente em regiões muito frias, até estar pronta para alguns usos. Caso o uso final não necessite de baixos teores de umidade, a secagem natural pode ser suficiente.

FIGURA 7 – PÁTIO PARA SECAGEM DE MADEIRA AO AR LIVRE.



FONTE: NICHOLLS E BRACKLEY, 2009.

O tempo de secagem de toras de madeira ao ar livre é influenciado por diversos fatores, inerentes ao material, relacionados à localização e às condições climáticas. Dentre os aspectos relativos a madeira citam-se, diâmetro da peça, densidade específica, espécie, teor de umidade final e inicial e presença de casca (NICHOLLS; BRACKLEY, 2009). Com respeito aos demais fatores Erber, Kanzian e Stampfer (2015) mencionam que o desempenho da secagem é influenciado pelos regimes de precipitação locais,

bem como o acesso do material ao sol e ao vento. Os autores ainda ressaltam que o armazenamento sem contato direto com o chão é benéfico no processo de secagem, no entanto cobrir o material depende do clima e da localização dos pátios, e.g., na Itália não houve muita influência no desempenho da secagem enquanto fortes efeitos foram descritos na Finlândia, Irlanda e Escócia, devido as condições de umidade local. Condições ideais para secagem ao ar livre são encontradas da primavera ao outono (ERBER; KANZIAN; STAMPFER, 2015). De acordo com Simpson e Hart (2000), para madeiras de grande espessura, o tempo de secagem varia de menos de 2 meses até mais de 9 meses, dependendo se o início do processo é no verão ou outono.

Para a produção de polpa celulósica não há a necessidade de um rigoroso controle da umidade da madeira previamente ao processo produtivo, pois o produto final não sofrerá alterações caso haja o aparecimento de rachaduras na madeira, ou outros defeitos relativos ao processo de secagem. Desta forma, utilizar um espaço de baixo custo de abertura e manutenção, como os pátios de secagem ao ar livre, de maneira que a matéria prima celulósica seja consolidada, reduzindo a quantidade de água presente torna-se uma possibilidade para empresas florestais de reduzir seu custo de transporte.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, encontra-se descrita a metodologia de pesquisa utilizada para este estudo. De acordo com Novikoff (2010), a pesquisa para se fazer científica passa por etapas de planejamento, implicando no desenvolvimento de um projeto, para tanto, faz-se, inicialmente, a classificação da pesquisa no contexto da metodologia científica, em seguida são detalhadas as etapas seguidas a fim de responder os questionamentos levantados anteriormente.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Lakatos e Marconi (2003), ciência é a sistematização de conhecimentos, formando um conjunto de proposições correlacionadas logicamente sobre o comportamento de fenômenos em que exista interesse. Uma primeira categorização possível de ser realizada é com relação à abordagem do problema, classificada como quantitativa (SEVERINO, 2002), pois por meio das técnicas de PO para a otimização do planejamento florestal, busca-se traduzir informações a fim de analisá-las. Quanto a sua natureza é possível classificá-la como aplicada, pois objetiva gerar conhecimento na aplicação prática na solução de um problema específico (DA SILVA; MENEZES, 2005).

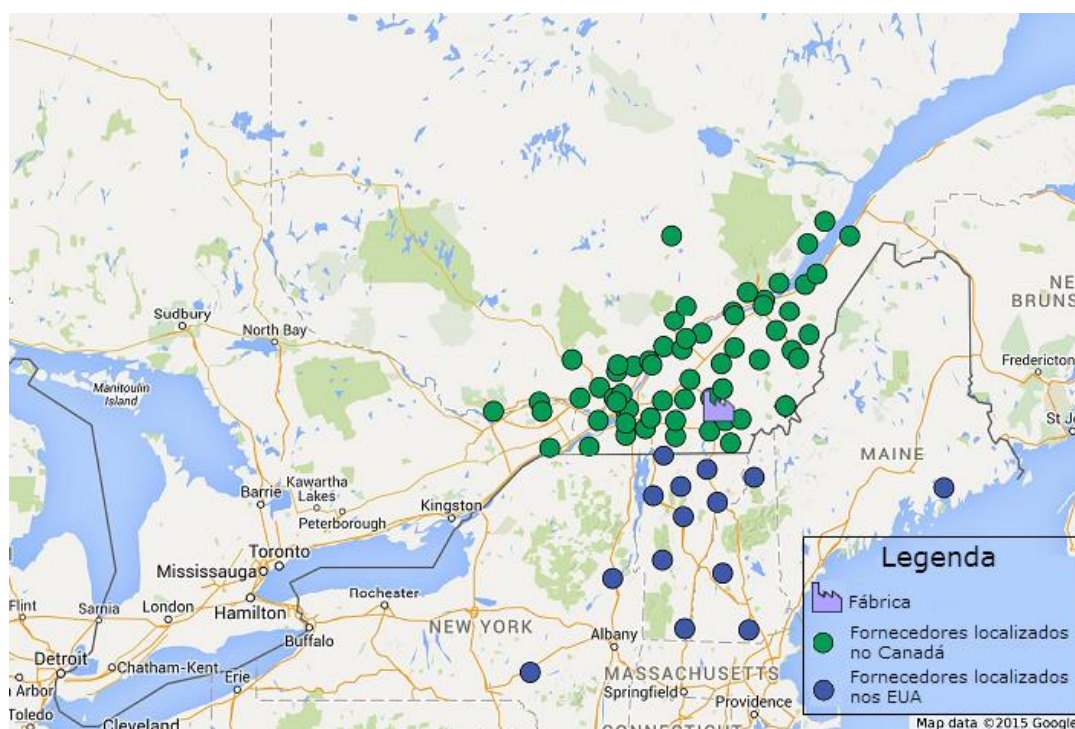
3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho busca-se desenvolver um modelo de planejamento de médio prazo (decisões táticas) com ênfase na etapa de aquisição da cadeia de suprimentos de uma empresa produtora de polpa e papel localizada na cidade de Windsor, na província de Québec. O Canadá possui um total de 348 milhões de hectares de florestas, que representam 9% do total mundial, desse montante 94% são de terras públicas e apenas 6% correspondem a áreas do

setor privado (NRC, 2014). A produtividade das florestas no entanto, ao ser comparada a encontrada no Brasil, é baixa.

A área de florestas do Québec corresponde a cerca de 20% do total canadense. A indústria florestal faz parte da base da economia da província, com mais de 250 cidades dependendo diretamente de atividades a ela relacionadas (MERN, 2010). A planta analisada da empresa produz celulose e papel a partir de fibra curta, necessário para a fabricação de papéis de imprimir e escrever, por exemplo. A matéria-prima que abastece a fábrica possui diferentes origens, podendo vir de florestas públicas, de áreas particulares em sua maioria de da Província do Québec e dos Estados Unidos, bem como de outras indústrias de base florestal. A Figura 8 ilustra a região de atuação da empresa, o mapa foi construído com base nos dados fornecidos pela mesma.

FIGURA 8 – MAPA DE ATUAÇÃO DA EMPRESA.



FONTE: A AUTORA com base em <http://maps.google.com> (2015).

O problema, baseado nos problemas de transporte e localização-alocação, tem por objetivo redesenhar parte da rede logística da empresa, minimizando custos desta etapa da cadeia de suprimentos da indústria durante um horizonte de planejamento de um ano. Os custos abordados serão o transporte da matéria-prima (madeira em tora) partindo de pontos de origem

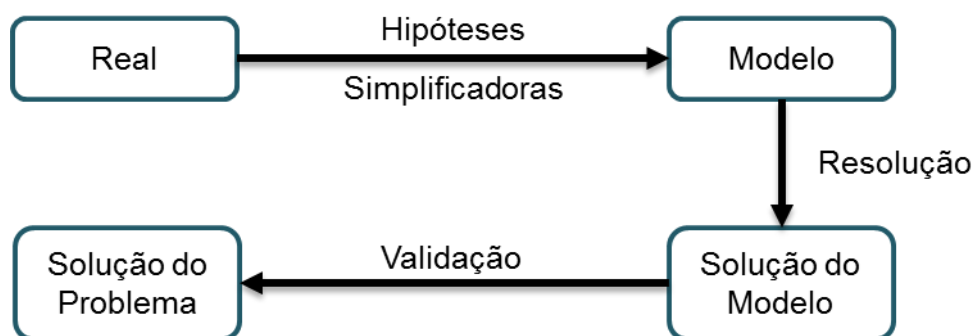
(fornecedores) ao ponto de demanda (empresa), custos de abertura de locais intermediários para estoque (*stock yards*), os custos de manuseio de material nestes estoques, bem como os custos de transporte de madeira para os *stock yards* a partir dos fornecedores e o custo para enviar a matéria-prima dos estoques à fábrica.

Duas características do problema foram os principais pontos de interesse deste estudo. A primeira diz respeito ao transporte da matéria-prima, em que busca-se reduzir seus custos respeitando as restrições de tráfego impostas durante a época de degelo, que compõe o aspecto sazonal do problema. Isto em termos operacionais implica que enquanto as restrições de carga forem ativas, uma vez que um veículo utilizado esteja em uma das zonas onde hajam limitações seu carregamento estará restringido, mesmo que seu destino encontre-se fora destas. Ou caso ele parta de uma região sem restrições para um destino em que ela seja ativa, sua carga deverá seguir as limitações impostas. Ademais, a segunda característica inerente ao problema busca definir se é vantajoso fazer uso de centros de distribuição avançados, aqui denominados estoques, em que a madeira passando um período armazenada reduza seu teor de umidade, auxiliando dessa forma, também, na redução dos custos de operação. Uma vez que a madeira perde umidade para o ambiente o número de cargas necessárias para transportar a mesma quantidade de material lenhoso diminui e pode-se evitar zonas de restrição de cargas ativas. Sem no entanto, interromper a fluidez do fluxo de material para produção.

3.3 ABORDAGEM MATEMÁTICA E RESOLUÇÃO

As abordagens matemáticas para os problemas de PO têm como objetivo fornecer soluções factíveis e se possível ótimas para a formulação proposta. Modelos matemáticos hipotéticos que simplifiquem a realidade, preservando as relações de causa e efeito sobre o problemas são amplamente utilizados na resolução de problemas complexos (PIZZOLATO, GANDOLPHO; 2013).

FIGURA 9 - USO DE MODELOS EM PO.



FONTE: PIZZOLATO; GANDOLPHO (2013).

Para a construção de modelos simplificam-se cenários encontrados no problema real viabilizando a construção conceitual do mesmo. Em seguida fazendo uso de técnicas adequadas resolve-se o modelo e faz-se sua validação (Figura 9), caso o modelo não seja validado as hipóteses assumidas podem ser revistas, os dados utilizados reavaliados e até o próprio modelo repensado.

Para a concepção do presente modelo são consideradas as seguintes entradas ou *inputs*: custos unitários associados ao transporte, custo fixo de abertura dos centros de estoque, custo de manuseio da madeira no estoque, demanda na planta produtora, as capacidades total e por período dos fornecedores, capacidade total e capacidade de manuseio nos estoques, as penalidades impostas durante o período de degelo e a vantagem obtida com a secagem da madeira.

Como decisões espera-se determinar quantos estoques serão abertos e utilizados, possibilitando o desvio das zonas de restrição e a redução a umidade contida na madeira e a quantidade de madeira enviada de cada fornecedores a fim de abastecer a empresa. Para isso assume-se que no início do horizonte de planejamento não existam centros de estoque abertos.

A variação do teor de umidade baseia-se na equação proposta por Simpson (2004), apresentada na Equação (2).

$$\Delta M = M^a T^b H^c \quad (2)$$

Em que:

ΔM = perda diária de umidade da madeira (%);

M = teor de umidade inicial (%);

T = Temperatura média diária (°F);

H = umidade relativa média diária (%);

a, b, c = coeficientes de regressão determinados por Simpson (2004).

A umidade relativa média (coletada as 6:00 a.m.) utilizada para determinar a variação de umidade foi retirada de TWN (2016), de onde utilizaram-se os dados apresentados para a região de Sherbrooke - East Angus, Quebec, próxima à planta produtora. A temperatura média diária encontra-se em ECCC (2016) para a região de St Camille. As restrições de carga foram determinadas a partir dos valores utilizados pelo Ministério de Transporte da Província do Québec, disponível em (MTQ, 2015). O teor de umidade inicial (M) considerado foi de 100%.

Os dados utilizados para a realização dos testes foram gerados por meio do método de Monte Carlo, a partir de dados reais coletados pela empresa durante o ano de 2013, cedidos para o Consórcio de Pesquisas FOR@C (*Forest to Costumer*) localizado na Université Laval, na cidade de Québec, e fornecidos por este grupo para a autora durante o estágio de pesquisa realizado na supracitada universidade no centro de pesquisa CIRRELT (*Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Reseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport*). Para a geração dos custos de transporte é considerado que não existe variação no custo ao longo dos períodos, causados pelo mercado, somente a alteração causada pela ativação das zonas de restrição de carga. Os dados referentes aos custos de abertura dos estoques e de manuseio nos estoques foram gerados aleatoriamente, sendo uma das limitações da pesquisa. As distribuições utilizadas para a geração das instâncias encontram-se descritas no Anexo I.

Os resultados obtidos com o modelo baseado nos problemas de transporte e localização de facilidades anteriormente descrito são comparados

com o modelo do problema de transporte tradicional com a adição das penalidades impostas pelas zonas de restrição de carga. Para testar as alternativas obtidas é feito um teste estatístico para comparação entre duas médias em que seguem-se os seguintes passos (CHWIF; MEDINA, 2010) estabelecendo a seguinte notação:

\bar{x}_{1i} é a observação obtida pela i-ésima instância da alternativa 1 (modelo proposto), para $i = 1, 2, \dots, b_1$;

\bar{x}_{2i} é a observação obtida pela i-ésima instância da alternativa 2 (modelo de transporte), para $i = 1, 2, \dots, b_2$;

Passo 1: Cálculo das diferenças.

Passo 2: Cálculo da média e do desvio padrão das diferenças.

Passo 3: Construção do intervalo de confiança, $[\theta_1, \theta_2]$, para o valor da média das diferenças μ , por meio da equação (3):

$$\mu \pm t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Passo 4: se o intervalo de confiança $[\theta_1, \theta_2]$:

1. Contiver o 0, ou seja, $\theta_1 < 0$ e $\theta_2 > 0$, nada pode ser concluído entre as médias das alternativas;
2. Caso , $\theta_1 > 0$ e $\theta_2 > 0$, então a média da alternativa 1 é maior;
3. Se o intervalo cair totalmente à esquerda ($\theta_1 < 0$ e $\theta_2 < 0$) a média da alternativa 2 é maior.

Os modelos propostos foram implementados na linguagem C++ utilizando a Tecnologia Concert e otimizado via CPLEX© 12.6.2. Para a realização dos testes computacionais foi utilizado um computador com processador Intel® Core™ i5-4210U 1.7GHz com Turbo Boost de até 2.1GHz, com 8 GB de memória RAM, em um sistema de 64 bits.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e descritos os modelos aplicados ao cenário atual da empresa, seguido do modelo proposto. Após a descrição dos modelos são apresentados os resultados obtidos por meio dos experimentos computacionais realizados.

4.1 MODELO DE TRANSPORTE

O modelo apresentado a seguir baseia-se no problema de transporte tradicional da Pesquisa Operacional, em que um conjunto de m pontos de demanda recebe insumos fornecidos a partir de n pontos de fornecimento. Sendo que o ponto de demanda i deve receber ao menos d_i unidades de insumo enquanto o ponto de fornecimento j pode fornecer no máximo s_j unidades. Nele é incorporado a penalidade decorrente das zonas de restrição ao custo de transporte. A utilização do presente modelo tem por objetivo servir como ponto de comparação para os resultados encontrados com o modelo proposto nesta pesquisa, exercendo o papel de cenário atual encontrado na empresa.

4.1.1 Formulação Matemática

Os conjuntos e os parâmetros utilizados encontram-se descritos abaixo.

		Unidade
$T = \{1, \dots, t \}$	Conjunto de períodos	
$I = \{1, \dots, i \}$	Conjunto de fornecedores	
$F = \{1, \dots, f \}$	Conjunto de fábricas	
d_{ft}	Demanda da fábrica f no período t .	TMA
k_{it}	Capacidade do fornecedor i no período t .	TMA
k_i	Capacidade total do fornecedor i .	TMA

C_{ift}	Custo unitário de transporte a partir do fornecedor i para a fábrica f no período t .	$\$/TMA$
β_{it}^{zone}	Penalidade por cruzar uma zona de restrição de peso ativa a partir de um fornecedor i no período t .	$0,0 - 1,0$
β_{ft}^{zone}	Penalidade por cruzar uma zona de restrição de peso ativa a partir da fábrica f no período t .	$0,0 - 1,0$

Definidos os parâmetros, a variável de decisão utilizada no modelo é apresentada.

x_{ift}	Quantidade de produto enviado do fornecedor i para a fábrica f no período t .	TMA
-----------	---	-------

A seguir é apresentado o modelo.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_i \sum_f \sum_t (C_{ift} x_{ift}) \times (1 + \beta_{it}^{zone}) \times (1 + \beta_{ft}^{zone}) \quad (4)$$

Sujeito à:

$$\sum_i x_{ift} \geq d_{ft} \quad \forall f, t \quad (5)$$

$$\sum_f \sum_t x_{ift} \leq k_i \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_f x_{ift} \leq k_{it} \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$x_{ift} \in \mathbb{R} \quad (8)$$

A função objetivo (4) visa reduzir os custos de transporte entre os fornecedores de madeira e a fábrica, multiplicado por um fator β quando existe o cruzamento de uma zona de restrição ativa.

A restrição (5) garante que a demanda da planta produtora seja suprida, sem contanto, extrapolar as capacidades totais (6) e capacidade por período (7) dos fornecedores. A restrição de domínio encontra-se na equação (8).

4.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA - MODELO PROPOSTO

Nesta seção será apresentada e descrita a abordagem matemática proposta para o problema estudado.

4.2.1 Aspectos e hipóteses da modelagem

O presente modelo é constituído de parâmetros (dados de entrada), variáveis de decisão, função objetivo e restrições. Cada um destes componentes encontra-se descrito abaixo. Para a construção do modelo as seguintes hipóteses foram definidas:

- O modelo utiliza como medida de carga toneladas métricas anidras (TMA);
- Apenas madeira bruta é transportada;
- O transporte de matéria-prima é realizado apenas por caminhões;
- Caso um carregamento seja transportado para um dos centros de distribuições abertos ele deverá permanecer neste local por pelo menos um período.
- Não existe um limite de tempo (*shelf life*) para a madeira armazenada nos pátios.

A seguir encontram-se descritos os conjuntos e os parâmetros utilizados.

		Unidade
$T = \{1, \dots, t \}$	Conjunto de períodos	
$T' = \{1, \dots, t \}(t')$	Conjunto de períodos'	
$I = \{1, \dots, I \}$	Conjunto de fornecedores	
$L = \{1, \dots, L \}$	Conjunto de estoques	
$F = \{1, \dots, F \}$	Conjunto de fábricas	
d_{ft}	Demanda da fábrica f no período t .	TMA
k_{it}	Capacidade do fornecedor i no período t .	TMA
k_i	Capacidade total do fornecedor i .	TMA

s_{lt}	Capacidade de manuseio no estoque l no período t .	<i>TMA</i>
s_l	Capacidade total do estoque l .	<i>TMA</i>
C_{ift}	Custo unitário de transporte a partir do fornecedor i para a fábrica f no período t .	$\$/TMA$
C_{ilt}	Custo unitário de transporte a partir do fornecedor i para o estoque l no período t .	$\$/TMA$
$C_{lft't}$	Custo unitário de transporte a partir do estoque l para a fábrica f da matéria prima que chegou no estoque no período t' e partiu no período t .	$\$/TMA$
O_l	Custo fixo (anual) para abrir e operar o estoque l .	CAD \$
M_{lt}	Custo de manuseio no estoque l no período t .	<i>TMA</i>
β_{it}^{zone}	Penalidade por cruzar uma zona de restrição de peso ativa a partir de um fornecedor i no período t .	0,0 – 1,0
β_{ft}^{zone}	Penalidade por cruzar uma zona de restrição de peso ativa a partir da fábrica f no período t .	0,0 – 1,0
β_{lt}^{zone}	Penalidade por cruzar uma zona de restrição de peso ativa a partir de um estoque l no período t .	0,0 – 1,0
$\alpha_{t't}^{drying}$	Vantagem obtida pela perda de umidade da madeira.	0,0 – 1,0

Descritos os parâmetros, definem-se abaixo as variáveis de decisão utilizadas no modelo.

x_{ift}	Quantidade de produto enviado do fornecedor i para a fábrica f no período t .	<i>TMA</i>
ψ_{ilt}	Quantidade de produto enviado do fornecedor i para o estoque l no período t .	<i>TMA</i>
$\varphi_{lft't}$	Quantidade de produto enviado do estoque l para a fábrica f , armazenado em t' , no período t .	<i>TMA</i>
$w_{lt't}$	Quantidade de produto armazenado no estoque l durante o período t' no instante t .	<i>TMA</i>
y_l	$\begin{cases} 1, \text{ se o estoque } l \text{ é aberto} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$	

A seguir é apresentada a função objetivo.

$$\text{Minimizar } Z = C^{sup-fac} + C^{sup-stock} + C^{stock-fac} + C^{open} + C^{handling} \quad (9)$$

Em que:

$$C^{sup-fac} = \sum_i \sum_f \sum_t (C_{ift} x_{ift}) \times (1 + \beta_{it}^{zone}) \times (1 + \beta_{ft}^{zone})$$

$$C^{sup-stock} = \sum_i \sum_l \sum_t (C_{ilt} \psi_{ilt}) \times (1 + \beta_{it}^{zone}) \times (1 + \beta_{lt}^{zone})$$

$$C^{stock-fac} = \sum_l \sum_f \sum_{t'} \sum_t (C_{lft't} \varphi_{lft't}) \times (1 + \beta_{lt}^{zone}) \times (1 + \beta_{ft}^{zone}) \times (1 - \alpha_{t't}^{drying})$$

$$C^{open} = \sum_l O_l y_l$$

$$C^{handling} = \sum_l \sum_t M_{lt} w_{lt't}$$

A parcela $C^{sup-fac}$ é referente aos custos de transporte entre fornecedores e a planta produtora de celulose e papel, enquanto $C^{sup-stock}$ e $C^{stock-fac}$ correspondem aos custos de transporte entre fornecedores e estoques e estoques e estoque e fábrica, respectivamente. O custo de abertura dos estoques é respresentado por C^{open} e os custos de manuseio dentro dos estoques é retratado pela parcela $C^{handling}$ da função objetivo.

Sujeita à:

$$w_{lt't} = \sum_i \psi_{ilt} \quad \forall t, l, t' = t \quad (10)$$

$$w_{lt't} = w_{lt'(t-1)} - \sum_f \varphi_{lft't} \quad \forall l, t' < t, t \quad (11)$$

$$w_{lt't} = 0 \quad \forall l, t' > t \quad (12)$$

$$\varphi_{lft't} = 0 \quad \forall l, t < t' \quad (13)$$

$$\sum_i x_{ift} + \sum_l \sum_{t' < t} \varphi_{lft't} \geq d_{ft} \quad \forall f, t \quad (14)$$

$$\sum_t \left(\sum_f x_{ift''} + \sum_l \psi_{ilt''} \right) \leq k_i \quad \forall i \quad (15)$$

$$\sum_f x_{ift} + \sum_l \psi_{ilt} \leq k_{it} \quad \forall i, t \quad (16)$$

$$\sum_t \sum_{t'} w_{lt't'} \leq s_l y_l \quad \forall l \quad (17)$$

$$\sum_{t'} w_{lt't} \leq s_l y_l \quad \forall l, t \quad (18)$$

$$w_{lt't} \leq BigMy_l \quad \forall t \quad (19)$$

$$\varphi_{lft't} \leq BigMy_l \quad \forall t', t, f \quad (20)$$

$$x_{ift} \in \mathbb{R} \quad (21)$$

$$\psi_{ilt} \in \mathbb{R} \quad (22)$$

$$\varphi_{lft't} \in \mathbb{R} \quad (23)$$

$$w_{lt't} \in \mathbb{R} \quad (24)$$

$$y_l \in \mathbb{B} \quad (25)$$

Os conjuntos de restrições (10) a (12) representam restrições de fluxo, em que a primeira garante que toda madeira no estoque l é igual a quantidade de material enviado pelos fornecedores ao estoque. A equação (11) garante que a quantidade de toras estocada em l , para todo $t' < t$, é equivalente a todo material que chega no período t no estoque menos a soma de produtos que deixam o local para serem enviados para a fábrica de polpa e papel. A restrição (12) assegura que não há material estocado para todo t' maior que t .

O conjunto de restrições (13) assegura que qualquer material que deixe o estoque fique armazenado por pelo menos um período. A equação (14) garante que a demanda da fábrica seja satisfeita. As expressões (15) e (16) apresentam, respectivamente, as capacidades total e por período dos fornecedores e garantem que estas não sejam excedidas. De maneira análoga

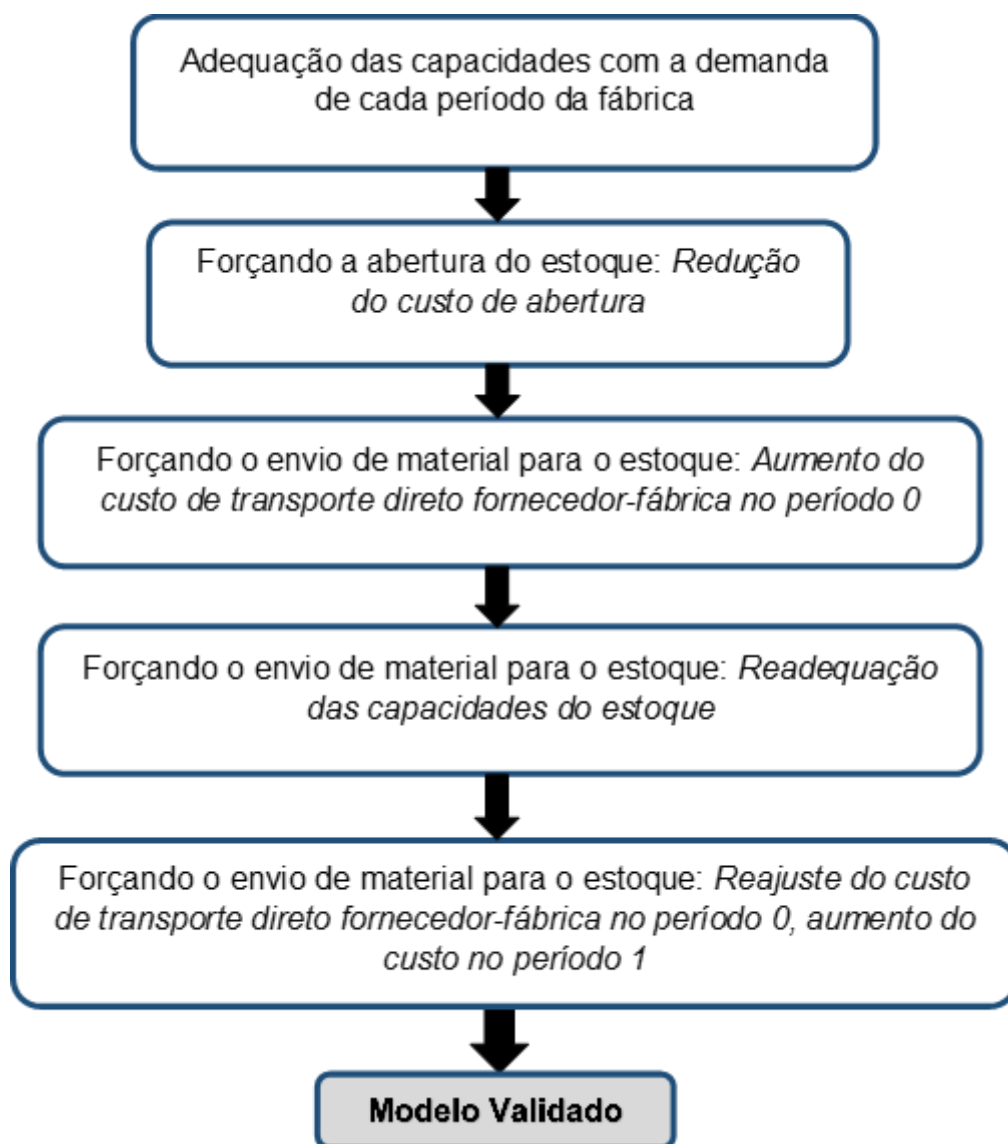
as restrições (17) e (18) são aplicadas para os pátios garantindo, desta maneira, que a capacidade total de todo I e sua capacidade de manuseio por período sejam respeitadas. As equações (19) e (20) asseguram que haja fluxo de material nos estoques apenas se este estiver aberto. O BigM utilizado nestes conjuntos de restrições foram definidos como um grande valor a partir da maior capacidade dos centros de distribuição avançados I . Por fim apresentam-se as restrições de domínio (21) a (25).

4.3 VALIDAÇÃO

Após a construção do modelo matemático, deu-se início ao processo de validação. Com este propósito criou-se uma pequena instância, com dois fornecedores, um estoque, uma planta produtora e dois períodos. A primeira etapa do processo deu-se com o ajuste das capacidades dos fornecedores e estoque para com a demanda da fábrica. Sendo estabelecido o equilíbrio desejado entre capacidades e demanda impeliu-se a abertura do estoque, para tanto foram definidos valores muito baixos para os custos fixos de abertura. Uma vez assegurada a existência do estoque buscou-se garantir o envio de material para este local, para este fim os custos de transporte entre os fornecedores e a planta produtora no período 0 foram elevados.

Com a abertura e o provimento de madeira no estoque as suas capacidades foram reajustadas, bem como os custos de transporte previamente alterados no período 0. O último estágio de validação foi o aumento nos custos de transporte direto entre fornecedores e a fábrica no período 1, enviando, desta forma, madeira do estoque para a planta produtora. Após a sequência de passos apresentada o modelo foi validado. De forma sintetizada os passos seguidos para a validação do modelo encontram-se ilustrados na Figura 10.

FIGURA 10 – FLUXOGRAMA REPRESENTANDO O PROCESSO DE VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.



FONTE: A AUTORA (2016).

É importante enfatizar que para as capacidades no período $t = 0$ a demanda deve ser menor que a disponibilidade total de madeira ($D_0 < K_0$). Para os períodos posteriores, a fim de manter o modelo válido, a demanda segue o padrão subsequente:

$$D_0 + D_1 \leq K_0 + K_1 \quad (26)$$

$$D_0 + D_1 + D_2 \leq K_0 + K_1 + K_2 \quad (27)$$

$$D_0 + D_1 + D_2 + D_3 + D_n \leq K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_n \quad (28)$$

4.4 TESTES COMPUTACIONAIS

Nesta seção são apresentadas respectivamente, a definição das classes de testes propostas e os resultados computacionais obtidos a partir dos testes.

4.4.1 Definição dos testes

Para a construção dos testes são propostas três classes de problemas, expostos no Quadro 3 abaixo.

QUADRO 3 - DESCRIÇÃO DA BASE DE TESTES.

Classe	Fornecedores	Estoques	Fábrica	Períodos	Distância Estoques	Cenários
P	50	10	1	13	15	10
					30	10
					50	10
M	100	20		26	15	10
					30	10
					50	10
G	200	40		52	15	10
					30	10
					50	10

FONTE: A AUTORA (2016).

A primeira classe (Testes P) contém 50 fornecedores, 10 estoques, uma fábrica e 13 períodos, a segunda (Teste M) conta com 100 fornecedores, 20 estoques, uma fábrica e 26 períodos e a última (Teste G) possui 200

fornecedores, 40 estoques, uma fábrica e 52 períodos. Cada período avaliado se refere a uma semana (7 dias). Todas as classes apresentadas incluem variações das distâncias para a instalação dos estoques, podendo estes serem alocados a uma distância que represente até 15% distribuição de probabilidade que descreva a distância entre fornecedores e fábrica, 30% ou 50%, com a fábrica como referência. Para todas as configurações foram testados 10 cenários.

4.4.2 Resultados computacionais

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir dos testes computacionais realizados.

A seguir, as Tabelas 2-4 apresentam os resultados computacionais obtidos nas instâncias testadas no modelo de transporte, que servirá como cenário de referência a fim de verificar se o modelo proposto oferece uma alternativa de redução de custos para a empresa. A Tabela 2 contém os resultados para os testes de classe P, enquanto a Tabela 3 representa os resultados alcançados pelos cenários da classe M, por fim a Tabela 4 reúne os resultados da classe G.

TABELA 2 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE P DE TESTES PARA O MODELO DE TRANSPORTE¹

T	F	E	D ^{ref}	C	Ótimo (CAD)	Tempo de Resolução (s)
13	50	10	15	1	\$ 11,112,097.00	0.047
13	50	10	15	2	\$ 11,418,948.00	0.047
13	50	10	15	3	\$ 11,333,216.00	0.047
13	50	10	15	4	\$ 4,834,749.50	0.031
13	50	10	15	5	\$ 7,451,974.50	0.047
13	50	10	15	6	\$ 10,863,888.00	0.031
13	50	10	15	7	\$ 8,604,028.00	0.047
13	50	10	15	8	\$ 11,241,693.00	0.047
13	50	10	15	9	\$ 12,391,647.00	0.047
13	50	10	15	10	\$ 8,195,906.50	0.031
Média					\$ 9,744,814.75	0.0422

Continua

¹ Onde lê-se T, F, E, D e C entende-se: Períodos, Número de Fornecedores, Número de Estoques, Distância dos Estoques e Número do Cenário.

Fim

13	50	10	30	1	\$ 7,207,021.50	0.047
13	50	10	30	2	\$ 8,549,085.00	0.047
13	50	10	30	3	\$ 10,606,009.00	0.047
13	50	10	30	4	\$ 12,003,660.00	0.031
13	50	10	30	5	\$ 10,508,687.00	0.047
13	50	10	30	6	\$ 11,236,941.00	0.031
13	50	10	30	7	\$ 9,758,571.00	0.031
13	50	10	30	8	\$ 9,535,552.00	0.047
13	50	10	30	9	\$ 15,712,730.00	0.047
13	50	10	30	10	\$ 6,690,813.50	0.031
Média					\$ 10,180,907.00	0.041
13	50	10	50	1	\$ 7,207,021.50	0.047
13	50	10	50	2	\$ 8,549,085.00	0.047
13	50	10	50	3	\$ 10,606,009.00	0.047
13	50	10	50	4	\$ 12,003,660.00	0.031
13	50	10	50	5	\$ 10,508,687.00	0.047
13	50	10	50	6	\$ 11,236,941.00	0.031
13	50	10	50	7	\$ 9,758,571.00	0.031
13	50	10	50	8	\$ 9,535,552.00	0.047
13	50	10	50	9	\$ 15,712,730.00	0.047
13	50	10	50	10	\$ 6,690,813.50	0.031
Média					\$ 10,180,907.00	0.041

FONTE: A AUTORA (2016).

TABELA 3 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE M DE TESTES PARA O MODELO DE TRANSPORTE.

T	F	E	D^{ref}	C	Ótimo (CAD)	Tempo de Resolução (s)
26	100	20	15	1	\$19,076,580.00	0.094
26	100	20	15	2	\$ 16,139,175.00	0.078
26	100	20	15	3	\$ 25,075,944.00	0.110
26	100	20	15	4	\$ 16,304,919.00	0.141
26	100	20	15	5	\$ 23,570,716.00	0.140
26	100	20	15	6	\$ 19,353,454.00	0.093
26	100	20	15	7	\$ 19,590,026.00	0.125
26	100	20	15	8	\$ 21,687,798.00	0.094
26	100	20	15	9	\$ 19,028,714.00	0.093
26	100	20	15	10	\$ 16,309,375.00	0.078
Média					\$ 19,613,670.10	0.105
26	100	20	30	1	\$ 15,264,107.00	0.093
26	100	20	30	2	\$ 22,466,702.00	0.125
26	100	20	30	3	\$ 17,194,962.00	0.093

Continua

						Fim
26	100	20	30	4	\$ 17,636,598.00	0.125
26	100	20	30	5	\$ 25,540,856.00	0.125
26	100	20	30	6	\$ 14,267,147.00	0.078
26	100	20	30	7	\$ 16,897,262.00	0.093
26	100	20	30	8	\$ 15,647,865.00	0.110
26	100	20	30	9	\$ 18,923,338.00	0.125
26	100	20	30	10	\$ 16,394,848.00	0.094
Média					\$ 18,023,368.50	0.106
26	100	20	50	1	\$ 23,798,990.00	0.109
26	100	20	50	2	\$ 26,520,436.00	0.109
26	100	20	50	3	\$ 20,852,914.00	0.110
26	100	20	50	4	\$ 21,507,068.00	0.093
26	100	20	50	5	\$ 12,891,063.00	0.093
26	100	20	50	6	\$ 20,447,206.00	0.110
26	100	20	50	7	\$ 20,044,480.00	0.094
26	100	20	50	8	\$ 23,614,190.00	0.109
26	100	20	50	9	\$ 20,902,076.00	0.125
26	100	20	50	10	\$ 20,323,962.00	0.094
Média					\$ 21,090,238.50	0.105

FONTE: A AUTORA (2016).

TABELA 4 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE G DE TESTES PARA O MODELO DE TRANSPORTE.

T	F	E	D ^{ref}	C	Ótimo (CAD)	Tempo de Resolução (s)
52	200	40	15	1	\$ 32,246,788.00	0.266
52	200	40	15	2	\$ 62,511,484.00	0.297
52	200	40	15	3	\$ 34,319,988.00	0.281
52	200	40	15	4	\$ 38,428,544.00	0.281
52	200	40	15	5	\$ 34,599,208.00	0.282
52	200	40	15	6	\$ 52,315,688.00	0.281
52	200	40	15	7	\$ 30,788,198.00	0.328
52	200	40	15	8	\$ 45,106,792.00	0.297
52	200	40	15	9	\$ 38,195,480.00	0.281
52	200	40	15	10	\$ 38,652,468.00	0.282
Média					\$ 40,716,463.80	0.288
52	200	40	30	1	\$ 43,099,652.00	0.250
52	200	40	30	2	\$ 38,433,264.00	0.281
52	200	40	30	3	\$ 43,847,736.00	0.281
52	200	40	30	4	\$ 35,037,748.00	0.282
52	200	40	30	5	\$ 37,284,468.00	0.297
52	200	40	30	6	\$ 41,380,948.00	0.266

Continua

52	200	40	30	7	\$ 32,725,916.00	0.281
52	200	40	30	8	\$ 39,198,020.00	0.297
52	200	40	30	9	\$ 45,673,764.00	0.265
52	200	40	30	10	\$ 46,151,548.00	0.281
Média					\$ 40,283,306.40	0.278
52	200	40	50	1	\$ 33,290,816.00	0.281
52	200	40	50	2	\$ 27,310,558.00	0.250
52	200	40	50	3	\$ 33,163,062.00	0.281
52	200	40	50	4	\$ 46,835,952.00	0.297
52	200	40	50	5	\$ 32,066,296.00	0.281
52	200	40	50	6	\$ 33,997,740.00	0.266
52	200	40	50	7	\$ 37,164,776.00	0.282
52	200	40	50	8	\$ 44,264,440.00	0.328
52	200	40	50	9	\$ 30,698,582.00	0.281
52	200	40	50	10	\$ 37,514,220.00	0.250
Média					\$ 35,630,644.20	0.280

FONTE: A AUTORA (2016).

O modelo de transporte alcançou a otimalidade para todas as instâncias testadas com baixa demanda computacional, chegando ao tempo máximo para o tempo de solução com o CPLEX de aproximadamente 0,30 segundos. O modelo de transporte foi resolvido pelo método dual simplex através do CPLEX. A Tabela 5, a seguir, apresenta os resultados médios agrupados obtidos pelo modelo de transporte.

TABELA 5 - VALORES ÓTIMOS E TEMPOS DE RESOLUÇÃO MÉDIOS OBTIDOS PELO MODELO DE TRANSPORTE.

Modelo de Transporte			
Cenários	Distância estoques	Valor Ótimo Médio (CAD)	Tempo de Resolução Médio (s)
Testes P	15	\$ 9,744,814.75	0.042
	30	\$ 10,180,907.00	0.041
	50	\$ 9,066,992.25	0.047
Testes M	15	\$ 19,613,670.10	0.105
	30	\$ 18,023,368.50	0.106
	50	\$ 21,090,238.50	0.105
Testes G	15	\$ 40,716,463.80	0.288
	30	\$ 40,283,306.40	0.278
	50	\$ 35,630,644.20	0.280

FONTE: A AUTORA (2016).

Os custos totais, acompanhando o aumento das dimensões das classes, dobraram quando comparam-se os testes cujos períodos somam 13 e os testes de 26 períodos, bem como os testes de 26 períodos em relação os testes de 52 períodos. Já com relação aos tempos de resolução a média dos tempos aumentou três vezes quando comparando os resultados obtidos pelos testes de classe M aos testes P, este mesmo padrão aplicou-se também ao se comparar os resultados dos testes com 52 períodos aos de 23 períodos. Os maiores testes apresentaram um tempo de solução aproximadamente 7 vezes mais elevados, ao serem comparados aos tempos dos menores testes.

A seguir, as Tabelas 6 – 8 mostram os resultados encontrados para o modelo proposto nesta pesquisa, baseado nos problemas de transporte – alocação. A Tabela 6 contém os resultados para os testes de classe P, enquanto a Tabela 7 representa os resultados alcançados pelas instâncias da classe M, e por fim a Tabela 8 reúne os resultados da classe G.

TABELA 6 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE P DE TESTES PARA O MODELO PROPOSTO.

T	F	E	D	C	Ótimo (CAD)	Tempo de Resolução (s)
13	50	10	15	1	\$ 10,866,942.00	0.360
13	50	10	15	2	\$ 10,678,314.00	0.360
13	50	10	15	3	\$ 11,059,325.00	0.360
13	50	10	15	4	\$ 4,785,159.00	0.437
13	50	10	15	5	\$ 7,132,650.50	0.328
13	50	10	15	6	\$ 10,452,543.00	0.391
13	50	10	15	7	\$ 8,483,519.00	0.344
13	50	10	15	8	\$ 9,890,726.00	0.641
13	50	10	15	9	\$ 11,515,470.00	0.421
13	50	10	15	10	\$ 8,095,095.00	0.328
Média					\$ 9,295,974.35	0.397
13	50	10	30	1	\$ 6,979,180.50	0.375
13	50	10	30	2	\$ 8,373,737.00	0.390
13	50	10	30	3	\$ 9,816,349.00	0.375
13	50	10	30	4	\$ 11,380,068.00	0.375
13	50	10	30	5	\$ 10,063,672.00	0.360
13	50	10	30	6	\$ 11,023,934.00	0.406
13	50	10	30	7	\$ 9,391,496.00	0.344
13	50	10	30	8	\$ 8,928,496.00	0.438
13	50	10	30	9	\$ 14,973,025.00	0.328

Continua

13	50	10	30	10	\$ 6,346,803.00	0.313
Média					\$ 9,727,676.05	0.370
13	50	10	50	1	\$ 8,185,219.50	0.312
13	50	10	50	2	\$ 6,669,172.00	0.297
13	50	10	50	3	\$ 9,984,067.00	0.375
13	50	10	50	4	\$ 9,189,067.00	0.313
13	50	10	50	5	\$ 6,635,388.00	0.375
13	50	10	50	6	\$ 11,164,653.00	0.390
13	50	10	50	7	\$ 6,734,821.50	0.296
13	50	10	50	8	\$ 10,418,679.00	0.407
13	50	10	50	9	\$ 10,582,583.00	0.360
13	50	10	50	10	\$ 7,534,682.50	0.297
Média					\$ 8,709,833.25	0.342

FONTE: A AUTORA (2016).

TABELA 7 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE M DE TESTES PARA O MODELO PROPOSTO

T	F	E	D	C	Ótimo (CAD)	Tempo de Resolução (s)
26	100	20	15	1	\$ 17,871,490.00	3.92
26	100	20	15	2	\$ 15,704,804.00	2.89
26	100	20	15	3	\$ 23,865,938.00	3.42
26	100	20	15	4	\$ 15,868,332.00	2.38
26	100	20	15	5	\$ 21,324,492.00	2.88
26	100	20	15	6	\$ 18,885,952.00	2.64
26	100	20	15	7	\$ 18,459,518.00	2.72
26	100	20	15	8	\$ 21,256,880.00	3.88
26	100	20	15	9	\$ 18,403,200.00	2.41
26	100	20	15	10	\$ 15,753,138.00	2.02
Média					\$ 18,739,374.40	2.91
26	100	20	30	1	\$ 14,932,543.00	3.53
26	100	20	30	2	\$ 21,101,292.00	2.98
26	100	20	30	3	\$ 16,906,962.00	2.19
26	100	20	30	4	\$ 17,182,470.00	2.45
26	100	20	30	5	\$ 23,815,636.00	3.36
26	100	20	30	6	\$ 14,179,689.00	1.81
26	100	20	30	7	\$ 16,540,312.00	2.48
26	100	20	30	8	\$ 15,071,727.00	2.88
26	100	20	30	9	\$ 18,644,344.00	3.45
26	100	20	30	10	\$ 15,836,693.00	3.34
Média					\$ 17,421,166.80	2.85
26	100	20	50	1	\$ 17,871,490.00	4.02
26	100	20	50	2	\$ 24,694,192.00	3.11
26	100	20	50	3	\$ 20,483,892.00	4.22

Continua

26	100	20	50	4	\$ 20,313,226.00	2.42
26	100	20	50	5	\$ 12,670,702.00	2.16
26	100	20	50	6	\$ 19,324,826.00	2.49
26	100	20	50	7	\$ 18,993,244.00	3.86
26	100	20	50	8	\$ 22,710,194.00	2.63
26	100	20	50	9	\$ 18,876,726.00	3.78
26	100	20	50	10	\$ 17,511,602.00	3.50
Média					\$ 19,345,009.40	3.22

FONTE: A AUTORA (2016).

TABELA 8 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA CLASSE G DE TESTES PARA O MODELO PROPOSTO

T	F	E	D	C	Ótimo (CAD)	Tempo de Resolução (s)
52	200	40	15	1	\$ 31,010,712.00	32.11
52	200	40	15	2	\$ 53,450,368.00	44.78
52	200	40	15	3	\$ 33,580,712.00	35.13
52	200	40	15	4	\$ 36,284,376.00	34.45
52	200	40	15	5	\$ 32,366,058.00	36.97
52	200	40	15	6	\$ 50,144,364.00	40.47
52	200	40	15	7	\$ 30,449,468.00	31.84
52	200	40	15	8	\$ 41,720,112.00	38.44
52	200	40	15	9	\$ 36,030,276.00	35.36
52	200	40	15	10	\$ 37,471,944.00	28.92
Média					\$ 38,250,839.00	35.85
52	200	40	30	1	\$ 40,766,420.00	32.22
52	200	40	30	2	\$ 36,465,328.00	35.66
52	200	40	30	3	\$ 40,900,792.00	34.33
52	200	40	30	4	\$ 33,513,294.00	32.33
52	200	40	30	5	\$ 34,916,612.00	30.66
52	200	40	30	6	\$ 37,934,596.00	42.28
52	200	40	30	7	\$ 31,003,142.00	35.39
52	200	40	30	8	\$ 37,583,208.00	35.89
52	200	40	30	9	\$ 44,335,132.00	32.38
52	200	40	30	10	\$ 43,214,572.00	46.09
Média					\$ 38,063,309.60	35.72
52	200	40	50	1	\$ 32,736,862.00	28.30
52	200	40	50	2	\$ 26,750,650.00	34.42
52	200	40	50	3	\$ 32,520,890.00	25.84
52	200	40	50	4	\$ 42,097,284.00	48.66
52	200	40	50	5	\$ 30,793,002.00	38.39
52	200	40	50	6	\$ 33,347,996.00	32.05
52	200	40	50	7	\$ 36,161,248.00	28.81
52	200	40	50	8	\$ 42,545,016.00	32.72

Continua

52	200	40	50	9	\$ 30,105,130.00	27.44
52	200	40	50	10	\$ 36,764,456.00	34.05
Média					\$ 34,382,253.40	33.07

FONTE: A AUTORA (2016).

O padrão encontrado para o aumento no custo total para o modelo de transporte repetiu-se para o modelo proposto, duplicando com o aumento das intâncias. Para todas os cenários testados o modelo proposto alcançou a otimalidade, sendo resolvido pelo CPLEX por meio do método *branch and cut*. O tempo de resolução consumido pelo *solver*, mesmo para a maior classe de testes proposta, foi baixo, alcançando no máximo aproximadamente 0,5 minuto na classe G. A seguir, na Tabela 9 são apresentadas o compilado das médias obtidas para os testes do modelo proposto.

TABELA 9 – VALORES ÓTIMOS E TEMPOS DE RESOLUÇÃO MÉDIOS OBTIDOS PELO MODELO PROPOSTO.

Cenários	Distância estoques	Modelo Proposto	
		Valor Ótimo Médio (CAD)	Tempo de Resolução Médio (s)
Testes P	15	\$ 9,295,974.35	0.397
	30	\$ 9,727,676.05	0.370
	50	\$ 8,709,833.25	0.342
Testes M	15	\$ 18,739,374.40	2.914
	30	\$ 17,421,166.80	2.848
	50	\$ 19,345,009.40	3.217
Testes G	15	\$ 38,250,839.00	35.85
	30	\$ 38,063,309.60	35.72
	50	\$ 34,382,253.40	33.07

FONTE: A AUTORA (2016).

A diferença entre os maiores testes e os menores é de quatro vezes o valor do custo total. Comparando o tempo de resolução do *solver* o incremento no tempo entre a classe P e M foi de aproximadamente 8 vezes o tempo médio de resposta do CPLEX. Um aumento de aproximadamente 94 vezes foi encontrado do tempo de solução dos testes com 52 períodos em relação ao de 13 períodos, enquanto o tempo de resolução da classe G quando comparada a classe M é 12 vezes maior. Apesar de haver um aumento de quase 100 vezes entre a menor classe de testes e a maior, não houve uma grande exigência de tempo a fim de atingir o ótimo global para os testes realizados.

Com a resolução de todos os cenários para ambos os modelos as alternativas obtidas foram avaliadas, através do teste estatístico de comparação de médias. A construção dos intervalos de confiança deu-se como descrito no Capítulo 3.3 da metodologia, com 95% de confiança, sendo o modelo proposto a alternativa 1 desta avaliação. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos pelo teste estatístico.

TABELA 10 – TESTE DE MÉDIAS ENTRE O MODELO PROPOSTO E O MODELO DE TRANSPORTE.

Cenários	Distância estoques	Intervalo de Confiança
Testes P	15	$-746,401.73 \leq \mu \leq -151,279.07$
	30	$-613,583.66 \leq \mu \leq -292,878.24$
	50	$-602,639.15 \leq \mu \leq -111,678.84$
Testes M	15	$-1,292,392.27 \leq \mu \leq -456,199.13$
	30	$-976,582.02 \leq \mu \leq -227,821.38$
	50	$-2,931,953.31 \leq \mu \leq -558,504.88$
Testes G	15	$-4,237,965.79 \leq \mu \leq -693,283.81$
	30	$-2,726,399.35 \leq \mu \leq -1,713,594.25$
	50	$-2,165,608.98 \leq \mu \leq -331,172.62$

FONTE: A AUTORA (2016).

Contrapondo os resultados obtidos pelas instâncias geradas no modelo proposto com os resultados do modelo de transporte, todos os intervalos de confiança obtidos caem totalmente a esquerda ($\theta_1 > 0$ e $\theta_2 > 0$). Este resultado vai ao encontro a terceira hipótese do teste estatístico descrito, levando à conclusão de que todas os cenários testadas possuem menor custo quando aplica-se modelo proposto por esta pesquisa. A fim de avaliar a redução gerada pelo modelo calculou-se o custo médio por TMA transportada, fazendo a razão entre o custo obtido por cenário e o total de madeira requerida pela fábrica, para todas as classes, válidos para este estudo. Os resultados encontram-se na Tabela 11.

TABELA 11 – CUSTO MÉDIO POR TMA TRANSPORTADA POR CLASSE PARA AMBOS OS MODELOS E A REDUÇÃO DE CUSTO GERADA.

Cenários	Distância estoques	Modelo Proposto	Modelo de Transporte	Redução aproximada de custo gerada pelo modelo
		Custo Médio por TMA Transportada (CAD/TMA)	Custo Médio por TMA Transportada (CAD/TMA)	
Testes P	15	\$ 42.44	\$ 44.49	5%
	30	\$ 43.00	\$ 45.01	4%
	50	\$ 39.50	\$ 41.12	4%
Testes M	15	\$ 40.75	\$ 42.65	4%
	30	\$ 39.02	\$ 40.37	3%
	50	\$ 42.77	\$ 46.63	8%
Testes G	15	\$ 41.98	\$ 44.68	6%
	30	\$ 41.43	\$ 43.85	6%
	50	\$ 37.61	\$ 38.98	4%

FONTE: A AUTORA (2016).

Com a geração dos custos por TMA transportada em ambos os modelos é possível observar a redução real provocada pelo modelo proposto por este estudo. Em um horizonte de planejamento de até um ano é possível reduzir custos relacionados à etapa de aquisição da indústria florestal, a fim de abastecer o sistema produtivo, de 4% a 8% de acordo com os resultados obtidos. Os testes que obtiveram os melhores desempenhos pertencem a classe M, com os estoques sendo gerados em até 50% da distribuição de probabilidade referente aos custos de transporte entre fornecedor e fábrica.

Os resultados obtidos mostram que o modelo proposto é viável tanto em relação ao tempo computacional gasto, e também ao ser comparado com os resultados obtidos pelo modelo de transporte, obtendo melhores resultados em todos os testes realizados.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho a técnica de modelagem matemática é utilizada para propor um modelo capaz de auxiliar na redução de custos encontrados durante a etapa de aquisição da cadeia de suprimentos da indústria florestal canadense e suas particularidades.

O cenário em que a empresa utilizada como referência para a pesquisa foi extenuantemente estudado a fim de se construir um modelo conceitual que se adequasse a realidade encontrada e atendesse a necessidade de seus gestores.

Para a construção do modelo conceitual, e por consequência do modelo matemático leva-se em consideração para sua elaboração questões locais, como a existência de políticas de restrições de cargas ativas durante o período de degelo na região de Québec, que devido a grande amplitude térmica da região, gera o enfraquecimento da malha rodoviária da província. Além do fator sazonal local, também é incluída na concepção do modelo o fator inerente a natureza da matéria prima florestal – madeira – de perda de umidade para o ambiente, que ocorre desde a derrubada da árvore até o seu equilíbrio com o meio em que se encontra. Esta redução de umidade pode vir a gerar a redução dos custos de transporte, etapa extremamente onerosa à indústria florestal.

Para incorporar estas características ao modelo foram utilizados parâmetros junto a função objetivo do modelo, identificados como α^{drying} e β^{zone} , em que o primeiro, reduz os custos de transporte entre centros de distribuição avançados de madeira e a fábrica, pois representa o teor de umidade perdido pela madeira ao ambiente. Enquanto o último, é uma penalidade aplicada a todos os custos de transporte quando as políticas de restrição de cargas estão ativas, sendo a porcentagem de peso a ser reduzida durante este período, fazendo com que mais cargas sejam necessárias para suprir a demanda da empresa.

Para a coleta de dados, etapa necessária para a conclusão da pesquisa, todos os parâmetros de entrada do modelo são identificados, e são levados ao consórcio de pesquisas FORAC, o qual os cede para este estudo.

Após a concepção do modelo e sua posterior concepção é feita a implementação computacional, por meio da linguagem de programação C++, e resolvido com o *solver* CPLEX fazendo uso da tecnologia Concert. Com a abordagem proposta o tempo computacional requerido para a solução do modelo proposto mostra-se baixo, estando na casa de segundos, mesmo para os maiores cenários. Somado ao bom desempenho com relação ao tempo computacional inclui-se a obtenção da otimalidade em todos os cenários

Em todos os testes executados para o modelo proposto em comparação ao modelo de transporte tradicional, o qual também leva em conta a atuação das políticas de redução de carga na época do degelo, houve a confirmação estatística de que os resultados obtidos geram redução de custo para a empresa. No entanto não foi observada diferença significativa nos resultados com a variação da distância em que os pátios de madeira foram instalados.

A redução de custo oportunizada pelo modelo proposto alcança CAD\$ 2,465,624.80 para os testes com 52 períodos (1 ano) considerando a criação de estoques a até 15% da distribuição probabilística da distância entre fornecedores e fábrica, correspondendo a 6% de economia ao se comparar com o modelo de transporte. Os maiores níveis de redução foram obtidos na classe de testes que continham 23 períodos e distância de 50%, em que foi possível obter 8% de economia nos custos totais avaliados, ou seja CAD\$1,745,229.10 em aproximadamente 6 meses de operações.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como apontamentos para o desenvolvimento do modelo aqui proposto sugere-se a utilização de dados reais para todos os parâmetros de entrada, para que o modelo responda de maneira mais fiel ao cenário real encontrado.

Além disso a fim de estudar o comportamento do modelo, também sugere-se que os custos de transporte sofram leves alterações, causadas pelas mudanças no mercado, ao longo do período, podendo ser possível estudar desta forma como as flutuações no mercado podem agir na tomada de decisões da empresa de abrir ou não centros de estoques intermediários para a consolidação da madeira.

Também ficam para trabalhos futuros, a inserção de outras fontes de matéria prima utilizadas pela empresa, como resíduos da indústria florestal (cavacos de madeira) e do emprego do transporte ferroviário para o transporte de material.

Por fim, sugere-se que a metodologia aqui apresentada seja aplicada a outros problemas envolvendo aspectos semelhantes ao exposto.

REFERÊNCIAS

ALONSO, L. R. L.. **O Problema da consideração de restrições de adjacência em um planejamento florestal**. 79 f. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) - Setor de Tecnologia e Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

ALONSO-AYUSO, A. et al. Forestry management under uncertainty. **Annals of Operations Research**, v. 190, p. 17-39, 2011.

ANDALRAFT, N. et al. A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and lagrangean relaxation. **Operations Research**, v. 51, n.4, p. 613-628, 2003.

BACHA, C. J. C. O uso de recursos florestais e as políticas econômicas brasileiras: uma visão histórica e parcial de um processo de desenvolvimento. **Estud. Econ**, São Paulo, v. 34, n. 2, p. 393-426, jun. 2004.

BARE, B. B. et al. A survey of systems analysis models in forestry and the forest products industries. **European Journal of Operational Research**, v.18, n. 1, p. 1-18, out. 1984.

BERGER, R. et al. Minimização de custos de transporte florestal com a utilização da programação linear. **Revista Floresta**, v. 33, n.1, 2003.

BERKOUNE, D. et al. Transportation in disaster response operations. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 46, n.1, p. 23-32, 2012.

BILLIONNET, A. Mathematical optimization ideas for biodiversity conservation. **European Journal of Operational Research**, v. 231, n.3, p. 514-534, 2013.

BRAMHALL, G. The drying of wood. In: MCKNIGHT, T. S; MULLINS, E. J. (Ed.). **Canadian Woods: Their Properties and Uses**. Univ. Toronto Press, 1981.

BRASIL, D. et. al. Heurísticas para o Problema de Sequenciamento de Carros em Linhas de Montagem. In: LOPES, H. S.; RODRIGUES, L. C. A.; STEINER, M. T. A. (Ed.). **Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional**. Curitiba: Omnipax, 2013, p. 289-306.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Serviço Florestal Brasileiro **Florestas do Brasil em Resumo 2013**: dados de 2007 - 2012.. Brasília, 2013.

BREDSTRÖM, D.; JÖNSSON, P.; RÖNNQVIST, M. Annual planning of harvesting resources in the forest industry. **International Transactions in Operational Research**, v. 17, n.2, p. 155-177, 2010.

CHAVES, V. H. C. **Perspectivas históricas da pesquisa operacional**. Rio Claro, 2011.

CHURCH, R. L. Tactical-Level Forest Management Models. In: WEINTRAUB A.; ROMERO C.; BJORDANL T.; EPSTEIN R. (Ed.). **Handbook of Operations Research in Natural Resources**. New York: Springer, 2007, p. 343-363.

CHWIF, L.; MEDINA, A. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. São Paulo. 2010.

DA SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2005, p. 138, 4 ed.

DA SILVA, G. F. et al. Metaheurística algoritmo genético na solução de modelos de planejamento florestal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, p. 160-166, 2009.

D'AMOURS, S., RONNQVIST, M. e WEINTRAUB, A. using operational research for supply chain planning in the forest products industry. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 46 , p. 265-281, 2008.

DORÉ, G. Development and validation of the thaw-weakening index. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 5, n. 4, p. 185-192, 2004.

DUDEJA, D. Thaw Weakening. **Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers**. Springer Netherlands, p. 1155-1156, 2014.

ECCC, Environment and Climate Change Canada. **Climate. Environment and Climate Change Canada.** 2016. Disponível em: <http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_e.html?stnID=5846&lang=e&province=QC&provSubmit=go&page=101&dCode=1>. Acesso em: 19 jan. de 2016.

EPSTEIN, R. et al. Harvest Operational Models in Forestry. In: WEINTRAUB A.; ROMERO C.; BJORDANL T.; EPSTEIN R. (Ed.); **Handbook of Operations Research in Natural Resources**. New York: Springer, 2007, p. 364-377.

ERBER, G.; KANZIAN, C.; STAMPFER, K. Modelling natural drying of European beech (*Fagus sylvatica* L.) logs for energy based on meteorological data. **Scandinavian Journal of Forest Research**, p. 1-8, 2015.

EVERGREEN. Frost Action. **Pavement Interactive**. Nov. 2006. Disponível em: <<http://www.pavementinteractive.org/article/frost-action>>. Acesso em: 01 jan. 2016

FOREST PRODUCTS LABORATORY. U.S. Department of Agriculture. **Air Drying of Lumber**, Madison. General Technical Report, p. 62. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-117, 1999.

FENG, Y.; D'AMOURS, S.; BEAUREGARD, R. The value of sales and operations planning in oriented strand board industry with make-to-order manufacturing system: Cross functional integration under deterministic demand and spot market recourse. **International Journal of Production Economics**, v. 115, n.1, p. 189-209, 2008.

FLEISCHMANN, B.; MEYR, H.; WAGNER, M. Advanced planning. In: STADTLER, H.; KILGER, C. (Ed.). **Supply chain management and advanced planning**. Berlin Heidelberg: Springer, 2005, p. 81-106.

FLISBERG, P.; NILSSON, S.; RÖNNQVIST, M. Optimized on-line process control of bleaching operations with OptCab. **NHH Dept. of Finance & Management Science Discussion Paper**. 2007.

FORSBERG, M., FRISK, M. e RONNQVIST, M. FlowOpt—a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry. **International Journal of Forest Engineering**, v. 16, p. 101-114, 2005.

FOULDS, L. R. Forestry applications of operations research. **System Modelling and Optimization**, p. 594-603, 1988.

FPAC, Forest Products Association of Canada. **Industry by the Numbers**. Forest Products Association of Canada. [Online] 2015. [Citado em: 06 de 03 de 2015.] <http://www.fpac.ca/index.php/en/page/industry-by-the-numbers>.

GASS, S. I.; ASSAD, A. A. **An annotated timeline of operations research: an informal history**. Springer Science & Business Media, 2004.

GAUDREAU, J. et al. Distributed operations planning in the softwood lumber supply chain: models and coordination. **International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice**, v. 17, p. 168-189, 2010.

GAUTAM, S.; LEBEL, L.; BEAUDOIN, D. Agility capabilities in wood procurement systems: a literature synthesis. **International Journal of Forest Engineering**, v. 24, n. 3, p. 216-232, 2013.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. **Moisture relations and physical properties of wood**. General Technical Report FPL-GTR-190, 2010.

GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial**. 211 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HARIDASS, K; VALENZUELA, J.; YUCEKAYA, A. D.; MCDONALD, T. Scheduling a log transport system using simulated annealing. **Information Sciences**, v. 264, p. 302-316, 2014.

HART, R. D. Evaluation of a simulation of subpavement conditions as they affect the implementation and removal of seasonal load restrictions. **International Conference on Winter Maintenance and Surface Transportation Weather**, p. 478-490, 2012.

HÄRTL, F.; HAHN, A.; KNOKE, T. Risk-sensitive planning support for forest enterprises: The YAFO model. **Computers and Electronics in Agriculture**, p. 58-70, 2013.

HELSTAD, K. Managing timber procurement in Nordic purchasing sawmills. **Acta Wexionensia**, 2006.

HENNINGSSON, M.; KARLSSON, J.; RÖNNQVIST, M. Optimization models for forest road upgrade planning. **Journal of Mathematical Modelling and Algorithms**, v. 6, n.1, p. 3-23, 2007.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Operations Research**. San Francisco: Holden-Day Inc, 1974.

HUGOS, M. **Key concepts of supply chain management. essentials of supply chain management**. 3.ed. John Wiley & Sons, p. 1-38, 2011.

IBA, Industria Brasileira de Árvores. **Indústria Brasileira de Árvores 2014**. 2014.

IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Madeiras Tropicais Brasileiras**. Brasília IBAMA-LPF, p. 418, 1997.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5 ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2003.

LEGÜES, A. D. et al. A tabu search approach for solving a difficult forest harvesting machine location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 179, n.3, p. 788-805, 2007.

LEHOUX, N. et al. **The value creation network of canadian wood fibre**. Cirrelt, 2012.

LUNDSTROM, J. et al. How reserve selection is affected by preferences in Swedish boreal forests. **Forest Policy and Economics**, v. 41, p. 40-50, 2014.

MACHADO, N. C. C. M. **Variação dimensional da madeira devida ao seu comportamento higroscópico**. 121 f. Dissertação (Mestrado em Construção de Edifícios) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2006.

MERN, Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles. **The forests of québec vast and fascinating**. Énergie et Ressources Naturelles Québec, 2010. Disponível em: <<http://www.mern.gouv.qc.ca/english/publications/international/forests.pdf>> Acesso: 11 mar. 2015.

MTQ, Ministère des Transports du Québec. **Dossier Dégel. Ministère des Transports du Québec**. 2015. Disponível em: <http://www.mtq.gouv.qc.ca/centredocumentation/Documents/Usagers/V%C3%A9hicule%20lourd/D%C3%A9gel%20-%20Restriction%20des%20charges/fiches_degel_2015.pdf> Acesso em: 20 de mar. de 2015.

NICHOLLS, D.; BRACKLEY, A. **House log drying rates in southeast Alaska for covered and uncovered softwood logs**. U.S. Department of Agriculture, Forest Serv. Portland. General Technical Report - GTR, p. 18. PNW-GTR-782, 2009.

Nørstebø, V. S.; JOHANSEN, U. Optimal transportation of logs and location of quay facilities in coastal regions of Norway. **Forest Policy and Economics**, p. 71-81, 2013.

NOVIKOFF, C. Pesquisa qualitativa: uma abordagem teórico-metodológica na educação. **Anais** - IV Seminário Internacional de Pesquisa e Estudos Qualitativos. 9-11 de Outubro de 2010.

NRC, Natural Resources Canada. **Forests**. Canadian Forest Service, 2016, Disponível em: <<http://www.nrcan.gc.ca/forests>>. Acesso: 10 fev. 2016.

NRC, Natural Resources Canada. **The State of Canada's Forests: Annual Report 2014**. Canadian Forest Service, 2014.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O. Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters. **Silva Fennica**, p. 77-89, 2010.

OUHIMMOU, M. et al. Furniture supply chain tactical planning optimization using a time decomposition approach. **European Journal of Operational Research**, v. 189, p. 952-970, 2008.

PALANDER, T.; VÄÄTÄINEN, J. Impacts of interenterprise collaboration and backhauling on wood procurement in Finland. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 20, n. 2, pp. 177-183, 2005.

PECORA, J. E.; RUIZ, A.; SORIANO, P. A hybrid collaborative algorithm to solve an integrated wood transportation and paper pulp production problem. **Journal of the Operational Research Society**, p. 1-14, 2015.

PÉCORA, J. E.; RUIZ, A.; SORIANO, P. Minimization of the wood density variation in pulp and paper production. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 45, p. 187-196, 2007.

PIZZOLATO, N. D.; GANDOLPHO, A. A. **Técnicas de Otimização**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

RADKAU, J. **Wood: A History**. Polity, 2012.

REGNIER, E. Evacuation Planning. **Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science**. John Wiley & Sons, 2010.

RIX, J. G. **Transportation optimization in tactical and operational wood procurement planning**. Montréal. École Polytechnique de Montréal, 2014.

RONNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical Programming**, p. 267-284, 2003.

RÖNNQVIST, M. OR challenges and experiences from solving industrial applications. **International Transactions in Operational Research**, v. 19, n. 1-2, p. 227-251, 2012.

ROWELL, R. M. Moisture Properties. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. CRC press, p. 77-97, 2012.

SCARPIN, C. T. et al. Otimização no serviço de saúde no estado do Paraná: fluxo de pacientes e novas configurações hierárquicas. **Gest. Prod.**, São Carlos , v. 15, n. 2, p. 275-290, Ago. 2008.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do Trabalho Científico**. São Paulo. Cortez, 2002.

SILVA, T. C. L. **Nova metodologia para resolução de problemas de transporte em casos esparsos**. 122 f. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) - Setores de Tecnologia e Ciências Exatas, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2012.

SIMONSEN, E.; ISACSSON, U. Thaw weakening of pavement structures in cold regions. **Cold regions science and technology**, v. 29, n. 2, p. 135-151, 1999.

SIMPSON, W. T.; HART, C. A. **Estimates of air drying times for several hardwoods and softwoods**. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Madison: Gen. Tech. Rep, FPL–GTR–121, p. 70, 2000.

SIMPSON, W. T. **Estimating air drying times of lumber with multiple regression**. U.S. Department of Agriculture, U.S. Department of Agriculture,. Madison:, FPL-RN-0293, 2004.

SMALTSCHINSKI, T.; SEELING, U.; BECKER, G. Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimised harvest scheduling. **Annals of forest science**, v. 69, n.5, p. 651-657, 2012.

SNIF, Sistema Nacional de Informações Florestais. Produção Florestal. **Comércio Externo**, 2016. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/comercio>>. Acesso em: 13 fev. 2016

SPIECKER, H. **Métodos da pesquisa operacional com aplicações em manejo florestal**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1975.

STADTLER, H. Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges. **European journal of operational research**, v. 163, n. 3, p. 575-588, 2005.

TWN, The Weather Network. **Farmzone. Farmzone: Sherbrooke - East Angus, Quebec.** 2016. Disponível em: <<http://www.farmzone.com/statistics/wind/cl7028124/sq052>>. Acesso em: 19 jan. 2016.

VAHID, S. et al. **Supply chain modelling frameworks for forest products industry: a systematic literature review** . Cirrelet, 2014.

VARAS, M. et al. Scheduling production for a sawmill: A robust optimization approach. **International Journal of Production Economics**, v. 150, p. 37-51, 2014.

VIELMA, J. P. et al. Improving computational capabilities for addressing volume constraints in forest harvest scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, p. 1246-1264, 2007.

WEINTRAUB, A. et al. **Handbook of Operations Research in Natural Resources**. New York: Springer Science, 2007.

WICKENS, G. E. Management issues for development of non-timber forest products. **Unasylva**. v. 42, n. 165, p. 3-8, 1991.

YADAV, P. Improving Public Health In Developing Countries Through Operations Research. **Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science**. John Wiley & Sons, 2010.

ANEXO I

Distribuições utilizadas para a geração de instâncias

1) Custo de Transporte Fornecedor – Fábrica

Distribuição Gamma com parâmetros: $\alpha = 1.84008$; $\beta = 29.5743$

2) Custo de Transporte Fornecedor – Estoque

a. Distância 15:

Distribuição Lognormal com parâmetros $\mu = 3.50481$; $\sigma = 0.843007$

b. Distância 30

Distribuição Lognormal com parâmetros $\mu = 3.21177$; $\sigma = 0.853248$

c. Distância 50

Distribuição Lognormal com parâmetros $\mu = 2.92786$; $\sigma = 0.884599$

3) Custo de Transporte Estoque – Fábrica

a. Distância 15

Distribuição Gamma com parâmetros: $\alpha = 1.9497$; $\beta = 4.55686$

b. Distância 30

Distribuição Weibull com parâmetros: $\alpha = 18.7119$; $\beta = 1.7471$

c. Distância 50

Distribuição Lognormal com parâmetros $\mu = 3.08999$; $\sigma = 0.789401$

4) Demanda Fábrica

Distribuição Normal com parâmetros $\mu = 17428.4$; $\sigma = 6341.12$

5) Capacidade Fornecedor

a. Total

Distribuição Gamma com parâmetros: $\alpha = 0.579605$; $\beta = 8535.23$

b. Período

25% da capacidade total

6) Capacidade Estoque

a. Total

25% da capacidade dos fornecedores

b. Período

25% da capacidade total dos estoques

- 7) Custo fixo de Abertura: Estoques
Geração Aleatória entre 100 e 500.
- 8) Custo de Manuseio: Estoques
Geração Aleatória entre 10 e 50.